

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLAVIO DELATTRE LEVIS

ANÁLISE DE RUGOSIDADE E PERDA DE CARGA EM UM TÚNEL ESCAVADO
EM ROCHA COM PISO REVESTIDO EM CONCRETO

CURITIBA

2018

FLAVIO DELATTRE LEVIS

ANÁLISE DE RUGOSIDADE E PERDA DE CARGA EM UM TÚNEL ESCAVADO
EM ROCHA COM PISO REVESTIDO EM CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José J. Ota

CURITIBA

2018

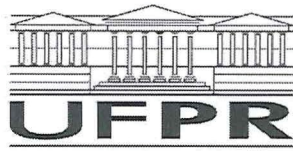
L666a Levis, Flavio Delattre

Análise de rugosidade e perda de carga em um túnel escavado em rocha com piso revestido em concreto [recurso eletrônico] / Flavio Delattre Levis, 2018.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Orientador: Prof. Dr. José J. Ota

1. Mecânica de rochas. 2. Rocha - escavação. 3. Análise numérica.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José J. III. Título.

CDD 515.35



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FLAVIO DELATTRE LEVIS** intitulada: **ANÁLISE DE RUGOSIDADE E PERDA DE CARGA DE UM TÚNEL ESCAVADO EM ROCHA COM PISO REVESTIDO EM CONCRETO**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Junho de 2018.


JOSÉ JUNJI OTA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


MARCOS ROGÉRIO SZELIGA

Avaliador Externo (UEPG)


BRUNO VÍCTOR VEIGA

Avaliador Externo (UFPR)


ANDRÉ LUIZ TONSO FABIANI

Avaliador Interno (UFPR)

Dedico esse trabalho aos meus pais, por todo apoio dado a minha formação, à minha amada esposa, pelo apoio, compreensão, tolerância e paciência ao longo dos anos de minha dedicação a esse trabalho, e a meu filho Eduardo, que me inspira todos os dias na busca em ser melhor e me superar.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, José J. Ota, por todo conhecimento que me foi dado, pela paciência em sua orientação, e pela amizade e bons momentos passados juntos.

Ao curso de pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais, do Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de expandir e compartilhar os conhecimentos dessa nobre área.

Aos professores da banca Dr. André Luiz Tonso Fabiani, Dr. Bruno Victor Veiga e Dr. Marcos Rogério Széliga, pelas contribuições e sugestões realizadas ao trabalho.

Ao funcionário Celmar Mattos pela sempre presente presteza e simpatia.

À Intertechne Consultores Associados e meus colegas de trabalho, pela oportunidade e grande apoio dados na elaboração desse trabalho.

Você deverá tomar cada fracasso
como princípio de triunfo, sempre que
dele extrair o elemento que lhe faltou para
vencer.

RAUMSOL

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de perdas de carga em túneis de adução através de diferentes métodos de estimativa de rugosidade de rocha, em conjunto com métodos de composição de rugosidades. O estudo foi realizado num túnel de adução de uma usina localizada no Peru, com aproximadamente 14 km de comprimento e cuja seção arco-ferradura possui o piso revestido em concreto. Todas as análises foram realizadas numericamente com base em medições obtidas através de um escaneamento a laser, onde o valor de perda de carga calculado foi comparado ao valor de perda de carga medido durante operação da usina. Dentre os métodos de estimativa de rugosidade, o de *Colebrook*, *Wright* e *IBA* apresentaram melhores resultados, com a perda de carga resultando abaixo de 20% do valor medido. Já em relação aos métodos de composição de rugosidades, os resultados apresentaram pouca dispersão entre si, com todos os coeficientes de variação resultando abaixo de 6%. Frente à gama de resultados obtidos e ao grande montante que a perda de carga representa na vida útil de uma usina hidrelétrica, ficou nítida a importância de definir uma metodologia para estimar a rugosidade de túneis escavados em rocha com piso revestido em concreto, onde as informações apresentadas neste trabalho dão grande subsídio para futuros projetos.

Palavras-chave: Perdas de carga. Rugosidade hidráulica. Composição de rugosidades. Rugosidade de túneis. Coeficiente de Manning.

ABSTRACT

This paper presents an analysis over a hydroelectric adduction tunnel head loss, using different methods to determine the tunnel roughness in parallel with methods to compose different roughnesses. The study was conducted on a Peruvian hydroelectric power plant adduction tunnel, with approximately 14 km length and a lined-invert horseshoe cross section. All analysis were mathematically developed based on measurements obtained through a laser scan, where the calculated head loss value was confronted with the head loss measured at the power plant during operation. From all tunnel roughness estimation methods, *Colebrook's*, *Wright's* and *IBA* presented the best results, with head losses resulting fewer than 20% of the measured value. In relation to the composition methods, all results presented low dispersion with coefficients of variations fewer than 6%. Considering the results and the impact that the head loss can represent at the hydroelectric power plant lifespan, it became clear the importance of defining a methodology to estimate the hydraulic roughness of lined-invert rock tunnels. Therefore, all information presented here can contribute for future projects.

Key-words: Head loss. Hydraulic roughness. Roughness composition. Tunnel roughness. Manning coefficient. Lined-invert tunnel roughness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE MOODY COM INDICAÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO NESSA DISSERTAÇÃO	20
FIGURA 2 – GRÁFICO DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS POR REINIUS (1970)	25
FIGURA 3 – GRÁFICO DE WRIGHT (1971) PARA DETERMINAR FATORES DE ATRITO f	26
FIGURA 4 – MÉTODO IBA – DESENHO ESQUEMÁTICO DAS DISTÂNCIAS MEDIDAS ENTRE EIXO DO TÚNEL E LINHA LONGITUDINAL DE ESCAVAÇÃO	29
FIGURA 5 – MÉTODO IBA – ARRANJO TÍPICO DE MEDIÇÕES LONGITUDINAIS	30
FIGURA 6 – MÉTODO IBA – ARRANJO TÍPICO DE MEDIÇÕES TRANSVERSAIS	31
FIGURA 7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA DIVISÃO DAS SUBÁREAS DE UMA SEÇÃO DE TÚNEL	34
FIGURA 8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA RANHURA E SUAS DIMENSÕES	36
FIGURA 9 – FOTO DO TRECHO EXPOSTO DO CIRCUITO DE GERAÇÃO DURANTE CONSTRUÇÃO	44
FIGURA 10 – SEÇÕES TÍPICAS DO TÚNEL DE ADUÇÃO ANALISADO	45
FIGURA 11 – FOTO DE APLICAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO NO TÚNEL DE ADUÇÃO	46
FIGURA 12 – FOTO DO TÚNEL COM PISO DE CONCRETO ACABADO	47
FIGURA 13 – TRAÇADO DAS FRENTES DE ESCAVAÇÃO DO TÚNEL	48
FIGURA 14 – FOTO DA APLICAÇÃO DE CONCRETO COM CINTA METÁLICA DE PROTEÇÃO	50
FIGURA 15 – DIMENSÕES DE PROJETO DOS NICHOS DE MANOBRA	51
FIGURA 16 – SEÇÃO TÍPICA DAS JANELAS DE ACESSO	52
FIGURA 17 – SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA OBTIDA ATRAVÉS DO SOFTWARE	53
FIGURA 18 – POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS	54
FIGURA 19 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 01	63
FIGURA 20 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 01	64

FIGURA 21 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 02	66
FIGURA 22 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 02	66
FIGURA 23 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 03	68
FIGURA 24 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 03	68
FIGURA 25 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 04	70
FIGURA 26 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 04	70
FIGURA 27 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 05	72
FIGURA 28 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 05	72
FIGURA 29 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 06	74
FIGURA 30 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 06	74
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 08	76
FIGURA 32 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 08	76
FIGURA 33 – RESUMO DE ALTURA E COEFICIENTES DE RUGOSIDADES COMPOSTAS SEPARADOS POR MÉTODO DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA	80
FIGURA 34 – RESUMO DE PERDAS CONTÍNUAS EM CADA FRENTE DE ESCAVAÇÃO	81
FIGURA 35 – PERDAS DE CARGA TOTAIS CALCULADAS NO CIRCUITO DE GERAÇÃO	82
FIGURA 36 – LINHAS DE ENERGIA E PIEZOMÉTRICA AO LONGO DO TÚNEL, PARA AS PERDAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS DE COLEBROOK E MÉDIA PONDERADA.....	83
FIGURA 37 – RUGOSIDADES DE ROCHA EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE ÁREA	84
FIGURA 38 – GRÁFICO DAS DISTRIBUIÇÕES DE ÁREAS EM FUNÇÃO DE SUA FREQUÊNCIA.....	85
FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA ENTRE VALORES CALCULADOS E VALOR MEDIDO	87

FIGURA 40 – COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO
DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DAS PERDAS DE CARGA UNITÁRIAS MÉDIAS91

FIGURA 41 – PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS CALCULADAS NOS
DIFERENTES MÉTODOS DE PONDERAÇÃO92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ALTURAS DE RUGOSIDADE PARA MATERIAIS COMUNS EM ADUÇÕES PRESSURIZADAS	21
TABELA 2 – COEFICIENTES DE MANNING PARA MATERIAIS COMUNS EM ADUÇÕES.....	21
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES DO TÚNEL DE ADUÇÃO.....	46
TABELA 4 – FRENTES DE ESCAVAÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO DE CHAGLLA	48
TABELA 5 – TRECHOS DE TÚNEL COM CONCRETO MOLDADO E BLINDAGEM	49
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS DE ESCAVAÇÃO.....	55
TABELA 7 – PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA RUGOSIDADE	61
TABELA 8 – PARÂMETROS RESULTANTES DAS ANÁLISES.....	62
TABELA 9 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 01	65
TABELA 10 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 02	67
TABELA 11 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 03	69
TABELA 12 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 04	71
TABELA 13 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 05	73
TABELA 14 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 06	75
TABELA 15 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRETE 08	77
TABELA 16 – RUGOSIDADES DE ROCHA RESULTANTES NAS FRENTES E MÉDIA TOTAL, SEPARADAS POR MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE	79
TABELA 17 – TABELA COM O RESUMO DOS COEFICIENTES DE MANNING COMPOSTOS E DAS ALTURAS DE RUGOSIDADE COMPOSTAS DE TODAS AS FRENTES.....	79
TABELA 18 – RESUMO DAS PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DO TÚNEL DE ADUÇÃO.....	81
TABELA 19 – PERDAS DE CARGA TOTAIS CALCULADAS NO CIRCUITO DE GERAÇÃO	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS EM REGIME TURBULENTO.....	17
2.2	MÉTODOS PARA ESTIMAR ALTURA DE RUGOSIDADE EM TÚNEIS ESCAVADOS EM ROCHA.....	22
2.3	COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES.....	31
2.4	PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS.....	34
2.4.1	Grades.....	34
2.4.2	Tomadas de Água	35
2.4.3	Ranhuras	35
2.4.4	Contrações	36
2.4.5	Passagens por recessos e acessos	37
2.4.6	Curvas	38
2.4.7	Expansões.....	39
2.4.8	Bifurcações (<i>wye-branch</i>)	40
2.4.9	Válvulas	40
2.5	FATOR DE CORREÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA	40
3	MATERIAIS E METODOLOGIAS	42
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO TÚNEL DE ADUÇÃO	43
3.2	OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS	52
3.3	ANÁLISE MATEMÁTICA.....	56
3.3.1	Estimativa da Rugosidade de Rocha Tratada	56
3.3.2	Composição de Rugosidades.....	57
3.3.3	Perdas Localizadas e Total	58
3.3.4	Perda de Carga Medida na Usina.....	58
4	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	RESULTADOS OBTIDOS DA MEDIÇÃO DA USINA.....	60
4.2	RESULTADOS OBTIDOS EM CADA FRENTE.....	61
4.2.1	Resultados da Frente 01	63

4.2.2	Resultados da Frente 02	65
4.2.3	Resultados da Frente 03	67
4.2.4	Resultados da Frente 04	69
4.2.5	Resultados da Frente 05	71
4.2.6	Resultados da Frente 06	73
4.2.7	Resultados da Frente 08	75
4.3	PERDA DE CARGA TOTAL CALCULADA.....	77
4.3.1	Perdas Localizadas e Adicionais	77
4.3.2	Perdas Contínuas no Túnel	78
4.3.3	Perdas de Carga Totais Calculadas no Circuito de Geração	82
4.4	ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA 83	
4.5	ANÁLISE DOS MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES.....	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS.....	94
	APÊNDICE A – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS NO TÚNEL.....	97
	APÊNDICE B – PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS E ADICIONAIS	138
	APÊNDICE C – PERDAS DE CARGA MEDIDAS DURANTE OPERAÇÃO.....	145
	ANEXO A – MÉTODO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO “WINTER-KENNEDY”	151

1 INTRODUÇÃO

Há séculos o ser humano se utiliza de diversos meios para transportar água de rios e reservatórios até os locais em que seu uso se faz necessário. Talvez o método mais famoso da antiguidade para transporte de água sejam os aquedutos, amplamente desenvolvidos e utilizados pelos romanos séculos atrás.

Os romanos também aproveitaram os conhecimentos dos antigos babilônios e egípcios para desenvolver e ampliar as escavações de túneis, tanto para o transporte de pessoas e exércitos, quanto para o transporte de água. Um dos túneis romanos mais famosos foi criado junto ao lago Fucino, na Itália do século I, para drenar suas águas através do monte Salviano. Com aproximadamente 5600 m estima-se que foram necessários quase 30000 homens e 11 anos para escavá-lo, sem no entanto saber ao certo do sucesso desta tarefa, pois os únicos vestígios do túnel original foram perdidos na escavação de um túnel de drenagem similar, durante o século XIX, no mesmo local. (BURRI e PETITTA, 2003)

Foi justamente no século XIX que o desenvolvimento e a escavação de túneis evoluíram em grande quantidade, com a utilização do ar comprimido em perfuratrizes pneumáticas em 1861 (WOOD, 2000). Esta invenção permitiu o aumento na escala das escavações para os mais diversificados usos, principalmente transporte, até chegar num dos usos mais comuns para este tipo de obra atualmente: túneis de adução e desvio para obras de geração hidroelétrica.

Ainda que túneis de adução hidráulica sejam utilizados para geração hidroelétrica desde o começo do século passado, sua caracterização no sentido de propriedades hidráulicas, para definir as perdas energéticas na central hidroelétrica, ainda é um tema de estudo atual.

Diversos autores buscaram caracterizar a rugosidade hidráulica de túneis escavados em rocha, com estudos que partem da metade do século passado. No entanto, torna-se muito difícil definir qual destas metodologias mais se aproxima do valor final obtido durante operação e, em paralelo a este fato, muitos túneis são construídos com seções compostas, com rocha nas paredes e teto e revestimento de concreto no piso, o que dificulta ainda mais esta caracterização.

Considerando ainda os custos envolvidos na construção e no tempo de recuperação do investimento pela geração elétrica, a perda de energia possui grande influência na viabilização de empreendimentos de médio e grande porte, o

que demonstra que a caracterização da perda de carga de túneis de adução de centrais hidrelétricas ainda é um tema de grande importância para a sociedade. Para se ter uma ordem de grandeza dessa influência, no empreendimento estudado nesse trabalho cuja potência instalada está na ordem de 400 MW um aumento de 1 metro de coluna d'água na perda de carga representa uma redução de receita de aproximadamente US\$ 1 milhão ao longo do período de concessão de 30 anos.

Neste sentido, esse trabalho tem como objetivo contribuir na compreensão e, em consequência, na aplicação mais assertiva de diversos modelos de estimativa de rugosidade de rocha em conjunto com modelos de composição de rugosidades em túneis pressurizados. Para realizar isto, apresenta um estudo de caso do túnel de adução da Central Hidroelétrica Chaglla, localizada no centro-oeste do Peru, no departamento de Huánuco. Este projeto compreende uma barragem no rio Huallaga situada aproximadamente 1,8 km à montante do desemboque da Quebrada Lluto, com um túnel de adução de aproximadamente 15 km de extensão, com chaminé de equilíbrio e uma casa de força externa localizada 2,6 km a jusante do desemboque da Quebrada Chimao.

O túnel de adução foi escavado em rocha calcárea pelo método de “*drill & blast*” (perfuração e explosão), com paredes e abóboda recobertos por concreto projetado e piso revestido de concreto compactado. Por praticamente toda sua extensão foram capturados pontos com coordenadas tridimensionais por empresa especializada, através de escaneamento laser, gerando após processamento superfícies tridimensionais de triângulos irregulares. Estas superfícies apresentam nível de detalhamento tal que, em trechos de maiores irregularidades, os vértices dos triângulos resultam em valores inferiores a 2 cm.

De maneira a facilitar a compreensão do leitor, este trabalho de dissertação foi desenvolvido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita uma breve apresentação a respeito do assunto, onde também são estabelecidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa. No segundo capítulo é apresentada uma revisão dos aspectos mais importantes relacionadas ao tema abordado, visando principalmente subsidiar o desenvolvimento da pesquisa e a interpretação dos resultados obtidos. O terceiro capítulo foi elaborado de maneira a descrever a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa, e feita uma discussão a

seu respeito. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações desta pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar diversas metodologias e escolher a melhor metodologia para calcular a perda de carga de túneis escavados em rocha com piso revestido em concreto, através da comparação de estimativas de rugosidade de rocha em conjunto com composições de diferentes rugosidades em seções plenas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os diferentes métodos de estimativa de rugosidade para túneis escavados em rocha, aplicado a um túnel escaneado a laser, disponibilizando informações para auxiliar na escolha do melhor método para projetos futuros;
- b) Comparar alguns métodos de composição de rugosidade em seções plenas, verificando o impacto que as diferenças entre os mesmos possuem no resultado final de perda de carga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as fundamentações teóricas necessárias para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS EM REGIME TURBULENTO

Para a determinação das perdas de carga contínuas em sistemas abertos ou fechados é preciso antes definir o regime de fluxo em que o mesmo se encontra. Em fluxos turbulentos, base de estudo deste trabalho, várias metodologias para o cálculo das perdas de carga foram desenvolvidas por diversos autores ao longo dos anos (STREETER, WYLIE e BEDFORD, 1999).

Um dos primeiros autores a determinar esta perda foi *Chézy*, que utilizou a relação entre a tensão tangencial e a velocidade em um fluxo uniforme e permanente, conforme equação [1].

$$\tau_o = \lambda \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \quad [1]$$

Onde:

- τ_o é a tensão tangencial no fluído [N/m²];
- λ representa um coeficiente adimensional;
- ρ é a massa específica do fluído [kg/m³];
- V é a velocidade média em que o fluído se desloca [m/s].

A partir desta relação, e da equação de energia deduzida por *Bernoulli*, foi possível definir uma relação para a perda de carga, conforme dedução apresentada na equação [2].

$$h_f = \frac{\tau_o \cdot L \cdot P}{\gamma \cdot A} = \lambda \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot \frac{L \cdot P}{\gamma \cdot A} = \lambda \cdot \frac{L}{R_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [2]$$

Onde:

- h_f é a perda de carga devido ao atrito nas paredes [m];
- L é o comprimento do trecho [m];
- P é o perímetro molhado do sistema, ou seja, a porção do perímetro no qual a parede se encontra em contato com o fluído [m];
- A é a área da seção molhada [m²];
- γ é o peso específico do fluído [N/m³];

- R_h é o raio hidráulico, definido pela relação entre a área da seção molhada e o perímetro molhado [m].

Com base nesta dedução, *Chézy* define uma declividade “S” que representa a perda de carga num determinado trecho em função do comprimento do mesmo, conforme equação [3].

$$S = \frac{h_f}{L} = \frac{\lambda}{R_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [3]$$

Desta maneira *Chézy* conseguiu definir a velocidade do fluxo em função de um coeficiente C e da relação entre o raio hidráulico e a declividade através da equação [4].

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\lambda}} \cdot \sqrt{R_h \cdot S} = C \cdot \sqrt{R_h \cdot S} \quad [4]$$

Esta equação [4] é conhecida como Fórmula de *Chézy*, na qual o coeficiente “C” originalmente era acreditado ser constante para qualquer tamanho de conduto ou rugosidade de parede. Atualmente verifica-se que tal afirmação não é verdadeira, onde este coeficiente pode ser determinado por diferentes métodos e equações (STREETER, WYLIE e BEDFORD, 1999).

Partindo da relação mostrada na equação [2], *Darcy* em 1857 e *Weisbach* em 1875 definiram a equação conhecida como universal para perdas de carga em sistemas pressurizados (LEVIN, 1968). Considerando que $\lambda = f/4$ e que a partir do raio hidráulico é possível definir um diâmetro hidráulico $D_h = 4 \cdot R$, *Darcy-Weisbach* definiram a equação [5] para o cálculo da perda de carga.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [5]$$

Para utilizar o fator de atrito f no lugar do coeficiente de *Chézy*, a equação [4] pode ser reescrita conforme a equação [6].

$$V = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \cdot \sqrt{R_h \cdot S} \quad [6]$$

O fator de atrito adimensional λ ou f foi extensivamente estudado ao longo dos anos. O primeiro grande estudo, apresentado por *Nikuradse* nos anos 1930, mostrou que este fator de atrito dependia somente de dois números adimensionais (LEVIN, 1968), conforme equações [7] e [8].

a) Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V.D_h}{\nu} \quad [7]$$

b) Rugosidade Relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D_h} \quad [8]$$

Onde:

- D_h é o diâmetro hidráulico do conduto [m];
- ν é a viscosidade cinemática do fluido [m²/s];
- ε é a altura de rugosidade no conduto [m].

Neste estudo, *Nikuradse* conseguiu relacionar graficamente os fatores de atrito, para diferentes rugosidades relativas, com o número de Reynolds, demonstrando visualmente onde se encontravam as diferentes zonas de operação do fluxo. Experimentalmente, *Nikuradse* reproduziu uma rugosidade artificial em tubulações utilizando grãos de areia, conseguindo desta maneira criar esta relação.

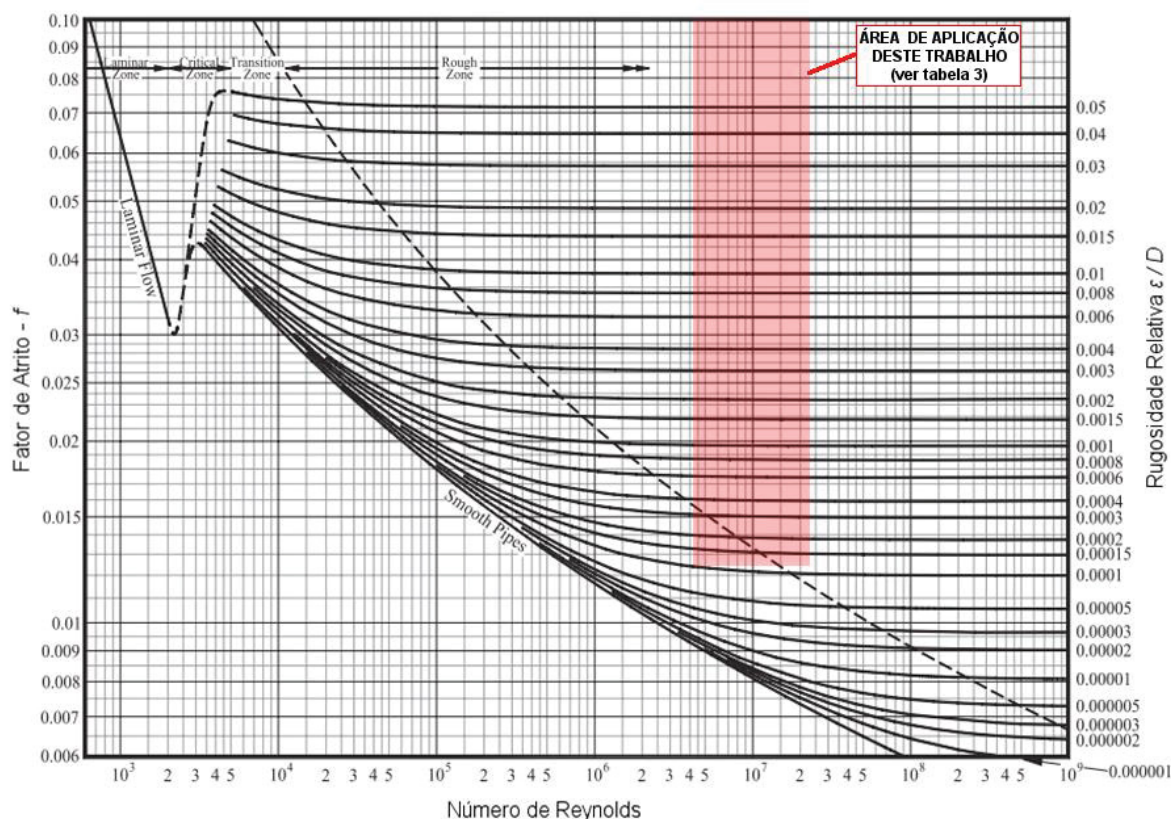
No entanto, alguns anos mais tarde, *Colebrook* e *White* reproduziram o estudo de *Nikuradse*, demonstrando que seus resultados não conseguiam se aproximar de tubos comerciais pois formavam uma rugosidade uniforme com os grãos. Ao criar uma rugosidade não-uniforme foi possível então se aproximar dos resultados obtidos para tubulações comerciais (RENNELS e HUDSON, 2012).

Desta maneira, *Colebrook* e *White* desenvolveram a equação [9], que caracteriza de maneira mais próxima a tubulações comerciais o fluxo plenamente rugoso (COLEBROOK e WHITE, 1937).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2. \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7.D_h} + \frac{2,51}{Re.\sqrt{f}} \right) \quad [9]$$

Logo em seguida, *Moody* publicou um diagrama baseado neste equacionamento proposto por *Colebrook-White* (1937), ficando mundialmente conhecido como “Diagrama de Moody” (FIGURA 1).

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE MOODY COM INDICAÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO NESSA DISSERTAÇÃO



FONTE: Adaptado de (RENNELS e HUDSON, 2012).

A partir da equação implícita de *Colebrook-White* (1937), diversos autores procuraram elaborar uma equação que caracterizasse de maneira explícita o fator de atrito. Dentre estas diversas propostas, a apresentada por *Haaland* em 1983 é a que aparenta ser a mais conveniente para ser utilizada, devido à sua simplicidade e boa precisão em relação às outras equações (RENNELS e HUDSON, 2012).

A equação [10] proposta por *Haaland* (1983) pode ser utilizada em substituição ao método iterativo desenvolvido por *Colebrook-White* (1937) para a área de aplicação deste trabalho, conforme FIGURA 1.

$$f = \left\{ -1,8 \cdot \log_{10} \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3,7 \cdot D_h} \right)^{1,11} \right] \right\}^{-2} \quad [10]$$

Como valores padrão de altura de rugosidade, podem-se utilizar os valores da TABELA 1 para os materiais mais comuns utilizados em aduções.

TABELA 1 – ALTURAS DE RUGOSIDADE PARA MATERIAIS COMUNS EM ADUÇÕES PRESSURIZADAS

MATERIAL	ALTURA DE RUGOSIDADE
	[mm]
Concreto, comum	1,00
Aço comercial	0,10

FONTE: (RENNELS e HUDSON, 2012) e (IDELCHIK, 2008).

Em paralelo com este desenvolvimento para sistemas pressurizados, o cálculo de perda de carga para fluxos permanentes uniformes em canais abertos foi baseado na dedução proposta por *Chézy*. Assim, a partir da equação [4] foi possível realizar uma relação do coeficiente de *Chézy* C com a raiz sexta do raio hidráulico (HENDERSON, 1966). Esta relação foi atribuída à *Manning*, onde o coeficiente n ficou conhecido por seu sobrenome.

$$C = C_m \cdot \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad [11]$$

O coeficiente C_m possui a função de fazer a conversão entre as unidades Inglesas e as do Sistema Internacional (S.I.). Para o Sistema Internacional adota-se o valor de 1,00 enquanto que para Unidades Inglesas adota-se o valor de 1,49 (STREETER, WYLIE e BEDFORD, 1999).

Partindo da equação [11], definiu-se aquela que ficou conhecida como Fórmula de *Manning* para o cálculo da velocidade em canais abertos:

$$V = \frac{C_m}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad [12]$$

Os valores de materiais mais comuns para o coeficiente de Manning em sistemas de adução são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 – COEFICIENTES DE MANNING PARA MATERIAIS COMUNS EM ADUÇÕES

MATERIAL	COEFICIENTE DE MANNING
	n [m ^{-1/3} .s]
Vidro, Plástico, Metal Usinado	0,010
Concreto, comum	0,013
Terra	0,020

FONTE: (HENDERSON, 1966).

Vale também ressaltar que esta relação somente é válida para fluxo plenamente rugoso na seguinte condição (HENDERSON, 1966):

$$n^6 \cdot \sqrt{R_h \cdot S} \geq 1,9 \cdot 10^{-13} \quad [13]$$

Para relacionar os coeficientes de rugosidade de *Chézy*, *Darcy-Weisbach* e *Manning* é possível utilizar as igualdades apresentadas na equação [14] (YEN, 2002).

$$\sqrt{\frac{f}{8}} = \frac{n}{R^{1/6}} \cdot \frac{\sqrt{g}}{C_m} = \frac{\sqrt{g}}{C} = \frac{\sqrt{g \cdot R_h \cdot S}}{V} \quad [14]$$

Para se determinar as perdas de carga em túneis de adução escavados em rocha, a formulação proposta por *Darcy-Weisbach* é adotada por apresentar resultados com menores discrepâncias do que a formulação de *Manning* para sistemas pressurizados (RONN e SKOG, 1997). Esta consideração também é adotada por *Bishwakarma* (2013), onde se concluiu que existe uma boa aproximação entre os métodos de *Darcy-Weisbach* e *Manning* quando a rugosidade relativa está dentro de uma faixa de 1/25 a 1/2000. Fora dessa faixa cada método é aplicado preferencialmente em função do parâmetro utilizado, seja a altura de rugosidade (*Darcy-Weisbach*) ou o Coeficiente de *Manning* (BISHWAKARMA, 2013).

2.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR ALTURA DE RUGOSIDADE EM TÚNEIS ESCAVADOS EM ROCHA

O estudo de estimativa de rugosidade de rocha data da metade do século XX, e vem se aperfeiçoando desde então. *Rahm* (1958) foi um dos primeiros a publicar resultados deste tipo de estudo propondo a equação [15], que define um parâmetro de rugosidade δ e que representa a sobre-escavação do túnel.

$$\delta = \frac{A_{99\%} - A_{1\%}}{A_{1\%}} \cdot 100\% \quad [15]$$

Este parâmetro é obtido pela relação das áreas de frequência 1% e 99%, onde a primeira representa a área na qual 1% das seções medidas são menores, e a outra 99% das seções.

Partindo deste valor de sobre-escavação, a rugosidade relativa equivalente para o túnel escavado em rocha é determinada pela relação mostrada na equação [16], para fluxos turbulentos plenamente desenvolvidos.

$$\delta^{-0,5} = 0,105 \cdot \log\left(\frac{15}{\varepsilon/R_h}\right) \quad [16]$$

Segundo *Rahm* (1958), a relação entre o fator de atrito f e δ pode ser determinado através da equação [17], desenvolvida de forma empírica.

$$f = 0,00275 \cdot \delta \quad [17]$$

Em paralelo *Colebrook* definiu uma espessura média de sobre-escavação t_m que é determinada como sendo a metade da diferença entre o diâmetro hidráulico médio e o diâmetro hidráulico para uma frequência de 1% (COLEBROOK, 1958). Com base nos dados utilizados por *Colebrook* (1958), esta espessura média de sobre-escavação pode ser aproximada como sendo a rugosidade máxima do túnel escavado. Ambos autores também definiram equações para estimar o coeficiente de rugosidade de *Darcy-Weisbach*, conforme equações [17] e [18].

$$f = 0,55 \cdot \frac{t_m \cdot R_h^{1,5}}{(R_h + t_m)^{2,5}} \quad [18]$$

Onde:

- t_m representa a sobre-escavação normal [m].

Aproximadamente uma década depois, *Priha* (1969), *Reinius* (1970) e *Wright* (1971) propuseram equacionamentos alternativos para a determinação do coeficiente de rugosidade, contestando àquele proposto por *Rahm* (1958).

Priha (1969) sugeriu inicialmente uma relação entre o parâmetro de rugosidade δ , definido por *Rahm* (1958), e a área relativa a frequência de 1%. Esta relação está expressa na equação [19] e, segundo *Priha* (1969), possui grande aderência ao equacionamento proposto por *Rahm* (1958) para túneis com seções transversais médias e grandes. Porém, para túneis de seção transversal pequena, o equacionamento proposto por *Priha* corrige uma discrepância apresentada no equacionamento de *Rahm* (PRIHA, 1969).

$$f = 0,0033 \cdot \delta \cdot \left(\frac{A_{1\%}}{A_{1\%} + 9}\right)^{0,5} \quad [19]$$

Reinius (1970) demonstrou através de novas medições que, para túneis escavados antes de 1946, o equacionamento proposto por *Rahm* (1958) poderia ser utilizado sem grandes variações. Após o ano de 1946 novos métodos de escavação foram introduzidos, o que levou *Reinius* (1970) a investigar outros equacionamentos que relacionassem o parâmetro de rugosidade δ e o fator de atrito f . Baseado nos dados obtidos por *Reinius* (1970), para uma faixa de δ variando de 15 a 60, três equações foram propostas. A equação [20], que melhor se encaixa aos dados fornecidos pelo autor, é adotada como um indicativo do fator de atrito f , enquanto as equações [21] e [22] servem como limites inferiores e superiores dos coeficientes, ou seja, representam respectivamente uma escavação lenta e cuidadosa ou uma escavação com progresso rápido (REINIUS, 1970). Para este trabalho adotou-se a equação [20] como base de cálculo, aquela que melhor se encaixa aos valores medidos por *Reinius*.

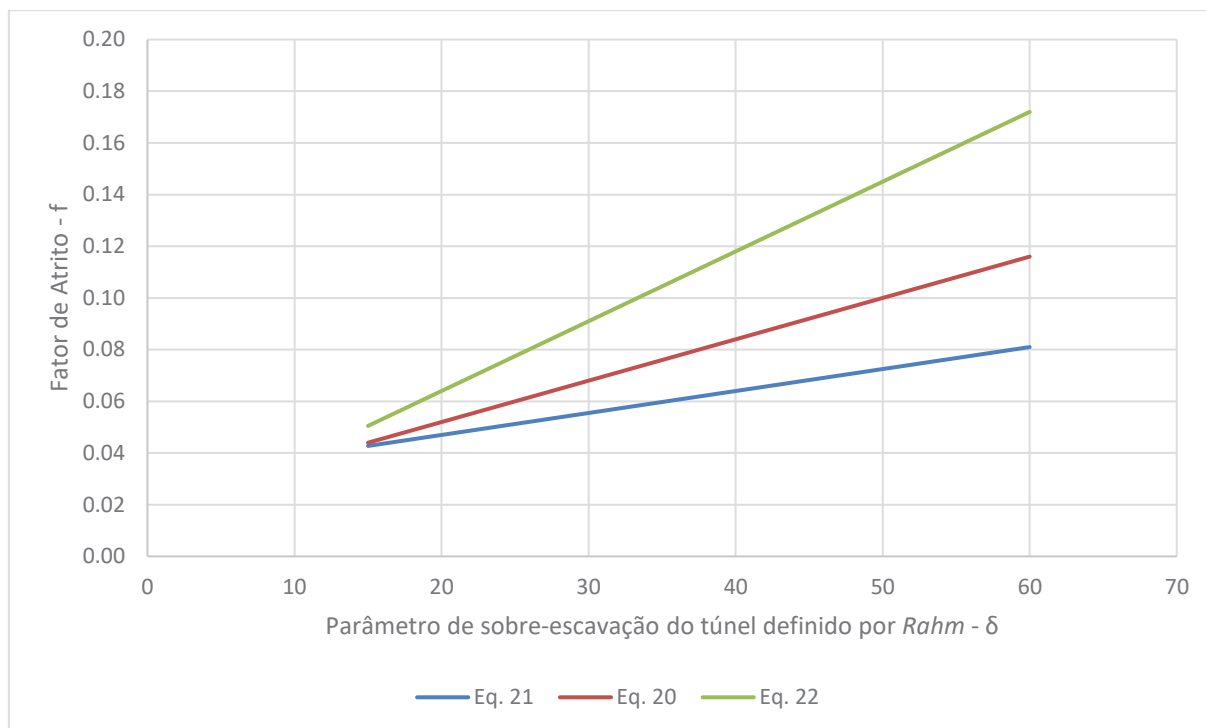
$$f = 0,02 + 0,0016.\delta \quad [20]$$

$$f = 0,03 + 0,00085.\delta \quad [21]$$

$$f = 0,01 + 0,0027.\delta \quad [22]$$

Na FIGURA 2 as equações propostas por *Reinius* (1970) são plotadas para melhor visualizar a faixa de aplicação deste método.

FIGURA 2 – GRÁFICO DAS EQUAÇÕES PROPOSTAS POR REINIUS (1970)



FONTE: Adaptado de (REINIUS, 1970).

Wright (1971) verificou mais tarde que a relação que determina o parâmetro de rugosidade δ não é linear, como proposto por *Rahm* (1958), e que para valores altos de rugosidade relativa este parâmetro torna-se altamente desproporcional (WRIGHT, 1971). Desta maneira *Wright* propôs a equação [23] que estima uma sobre-escavação natural do túnel, em função das áreas e perímetros com frequência acumulada de 1% e 50%. A partir desta sobre-escavação determina-se o fator de atrito f graficamente, utilizando como parâmetro principal a rugosidade relativa, que é a razão da sobre-escavação natural do túnel com o raio hidráulico para uma frequência de 50%.

$$t_n = \frac{A_{50\%} - A_{1\%}}{0,5 \cdot (P_{50\%} + P_{1\%})} \quad [23]$$

Onde:

- t_n é a sobre-escavação natural [m];
- $A_{50\%}$ e $A_{1\%}$ são as frequências acumuladas de áreas para as distribuições estatísticas de 50% e 1% respectivamente;
- $P_{50\%}$ e $P_{1\%}$ são as frequências acumuladas de perímetros molhados para as distribuições estatísticas de 50% e 1% respectivamente.

Já a sobre-escavação relativa é definida através da seguinte equação:

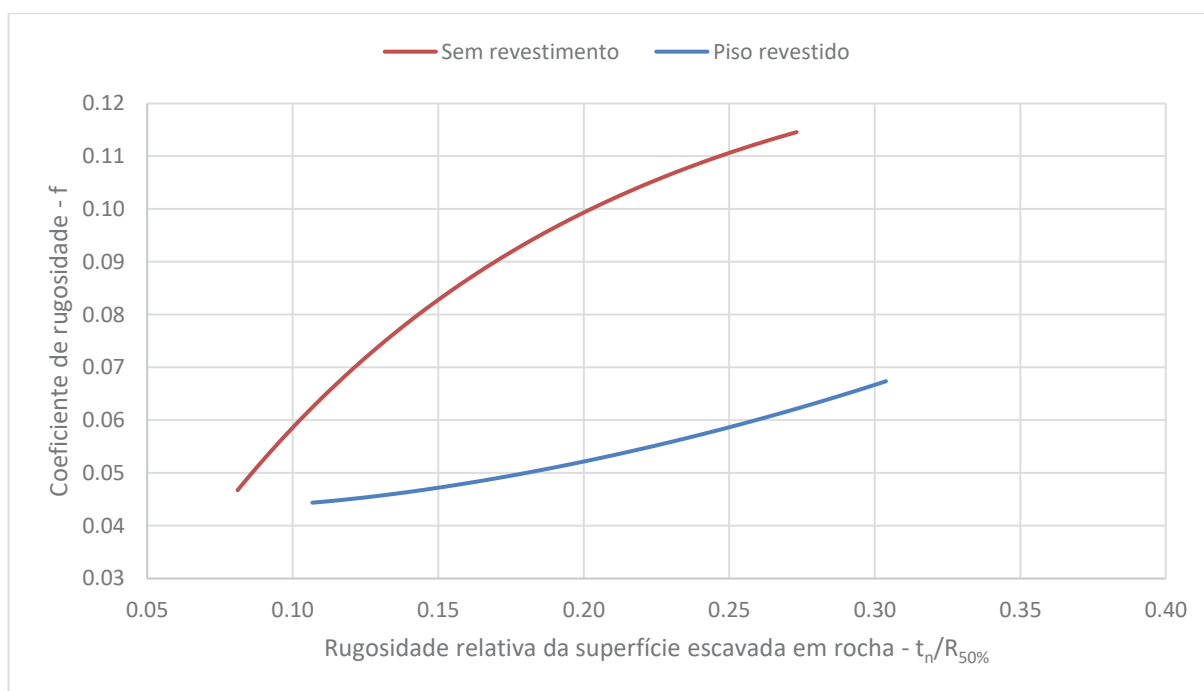
$$\delta = 2 \cdot \frac{t_n}{R_{50\%}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{t_n}{2 \cdot R_{50\%}}\right)^2} \cdot 100\% \quad [24]$$

Onde:

- $R_{50\%}$ representa o raio hidráulico para uma distribuição estatística de 50%.

O fator de atrito f pode ser determinado através dos gráficos do autor para túneis totalmente expostos em rocha ou com piso revestido, reproduzidos na FIGURA 3.

FIGURA 3 – GRÁFICO DE WRIGHT (1971) PARA DETERMINAR FATORES DE ATRITO f



FONTE: Adaptado de (WRIGHT, 1971).

Na mesma época outros dois autores também propuseram métodos para definir a rugosidade de um túnel escavado em rocha, *Huval* (1969) e *Johansen* (1966).

Huval propôs um método que estima a altura de rugosidade como sendo a diferença entre o diâmetro equivalente médio e o diâmetro equivalente mínimo do trecho em estudo. No entanto, como o próprio autor sugere, este método é mais indicado para estimar a rugosidade durante a etapa de projeto, com base em dados

estatísticos propostos pelo autor relacionados ao diâmetro e ao tipo de rocha (HUVAL, 1969). Esta altura de rugosidade é definida através da equação [25].

$$\varepsilon = D_m - D_n = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot (\sqrt{A_m} - \sqrt{A_n}) \quad [25]$$

Onde:

- D_m é o diâmetro equivalente médio;
- D_n é o diâmetro equivalente mínimo do trecho;
- A_m é a área média das seções;
- A_n é a área mínima do trecho analisado.

Johansen (1966), em contrapartida, utilizou a variação das áreas medidas em relação à área nominal de projeto, em conjunto a coeficientes experimentais. Por um lado, isto diminuiu a influência da disparidade entre área nominal de projeto ao que foi efetivamente executado, porém por outro leva à dependência de coeficientes experimentais válidos para o grupo de dados utilizado por *Johansen* (GARNAYAK, 2001). *Johansen* define a altura de rugosidade em uma dada seção através da equação [27].

$$\varepsilon_i = \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\Delta A_i}{\sqrt{A_i}} \right) \quad [26]$$

Considerando “m” seções transversais medidas através do túnel, a altura de rugosidade do trecho é determinada através da equação [27].

$$\varepsilon = \alpha + \beta \cdot \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta A_i}{\sqrt{A_i}} \right] \quad [27]$$

Onde:

- ε_i representa a altura de rugosidade numa dada seção “i” [m];
- ε é a altura de rugosidade do trecho em estudo [m];
- ΔA_i é a diferença absoluta entre a área da seção transversal “i” e a área nominal de projeto;
- A_i é área da seção transversal na seção “i” [m²];
- α e β representam coeficientes determinados experimentalmente pelo autor, onde o mesmo indica os valores de 0,15m e 0,37 respectivamente.

Quase duas décadas após estes estudos, outros dois autores propuseram métodos para estimar a rugosidade de rocha. *Solvik* (1988) definiu que esta

rugosidade de rocha é formada por dois valores distintos; a rugosidade resultante da variação de área e a rugosidade da variação ao longo do eixo das paredes e teto. Segundo *Solvik* (1988), a rugosidade da variação de área em uma dada seção é formada pela média das diferenças entre áreas adjacentes, dividida pelo perímetro naquele ponto, conforme definido na equação [28]. Já a rugosidade de parede foi arbitrada como um valor médio por *Solvik* (1988), de 0,15m, com base em dados experimentais (GARNAYAK, 2001).

$$\varepsilon_i = \frac{|A_i - A_{i-1}|}{P_i} \quad [28]$$

Esta rugosidade de variação de área pode ser obtida para “m” seções transversais, conforme equação [29]

$$\varepsilon_a = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \quad [29]$$

Ao combinar esta rugosidade de variação de área com a rugosidade de parede arbitrada, resulta na altura de rugosidade total conforme equação [30].

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_a \quad [30]$$

Onde:

- A_i é a área da seção transversal “i” [m²];
- A_{i-1} é a área da seção transversal anterior “i-1” [m²];
- P_i é o perímetro molhado da seção transversal “i” [m²];
- ε_i é a altura de rugosidade na seção transversal “i” [m];
- ε_a é a altura de rugosidade da variação de áreas de “m” seções [m];
- ε_p é a altura de rugosidade nas paredes (0,15m);
- ε é a altura de rugosidade total do túnel [m].

Ronn e *Skog* (1997) adotaram o mesmo conceito de *Solvik* (1988), ou seja, a rugosidade de rocha de um túnel é formada pela soma de duas medições distintas; àquela obtida pela variação de área em conjunto com a obtida pela variação da rugosidade ao longo de paredes e teto. No entanto, *Ronn* e *Skog* (1997) propuseram um método alternativo aos já propostos, chamado *IBA*. Neste, os autores utilizam as médias quadráticas das variações de área e variações de parede e teto para definir estas rugosidades. Enquanto a média quadrática da variação de parede e teto é utilizada integralmente, conforme equação [32], a média quadrática da variação de

área possui um coeficiente corretor de 0,53, conforme equação [33] (RONN e SKOG, 1997).

A rugosidade de parede e teto é inicialmente definida pela média quadrática de r medidas paralelas ao eixo principal do túnel, de acordo com a equação [31].

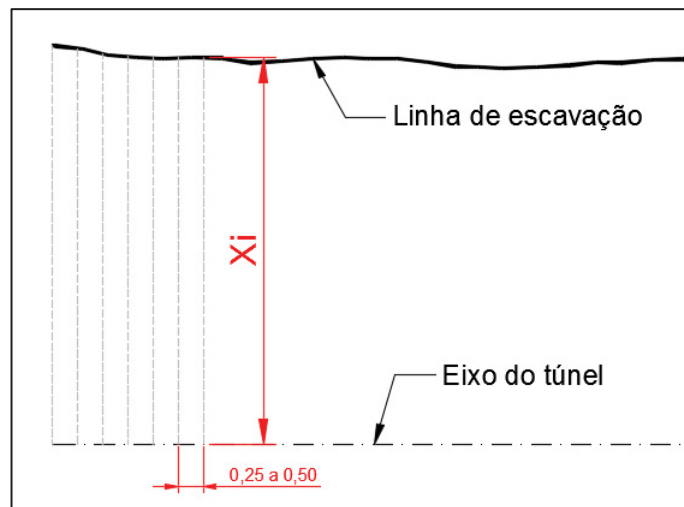
$$rms_j = \sqrt{\frac{\sum_1^r (x_i - \bar{x})^2}{r}} \quad [31]$$

Onde:

- x_i representa a distância ao longo de uma linha longitudinal de escavação até o eixo em um dado ponto “i” [m];
- \bar{x} é a distância média entre uma linha longitudinal de escavação e o eixo [m].

A FIGURA 4 apresenta esquematicamente como estas medidas são obtidas ao longo do eixo.

FIGURA 4 – MÉTODO IBA – DESENHO ESQUEMÁTICO DAS DISTÂNCIAS MEDIDAS ENTRE EIXO DO TÚNEL E LINHA LONGITUDINAL DE ESCAVAÇÃO



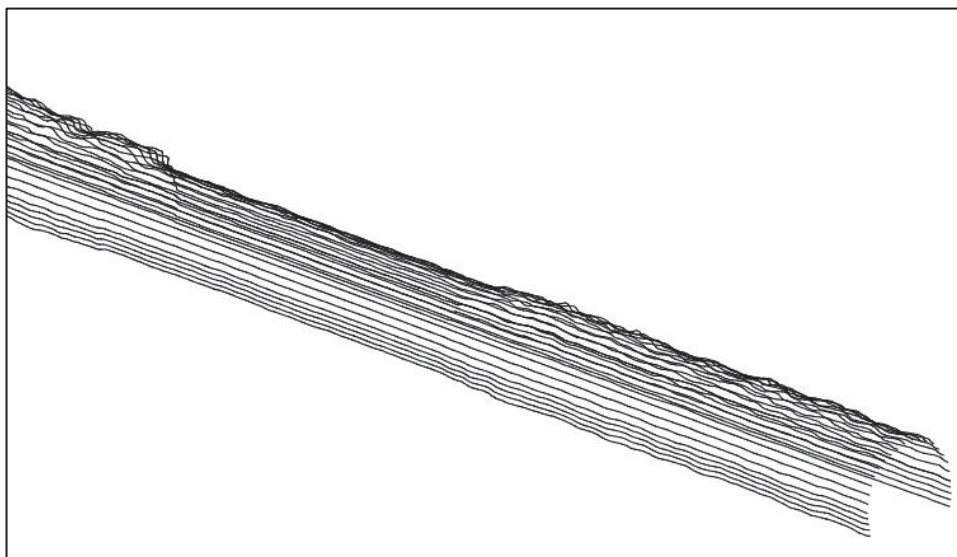
FONTE: O Autor (2018).

Considerando m linhas longitudinais medidas ao longo do túnel com um número mínimo de 3 linhas, com uma precisão de 0,25m a 0,50m de ponto a ponto, a rugosidade da parede é definida através da equação [32].

$$rms_p = \sqrt{\frac{\sum_1^m (rms_j)^2}{m}} \quad [32]$$

A FIGURA 5 demonstra visualmente o arranjo das linhas distribuídas longitudinalmente ao longo do eixo de um trecho de túnel.

FIGURA 5 – MÉTODO IBA – ARRANJO TÍPICO DE MEDIÇÕES LONGITUDINAIS



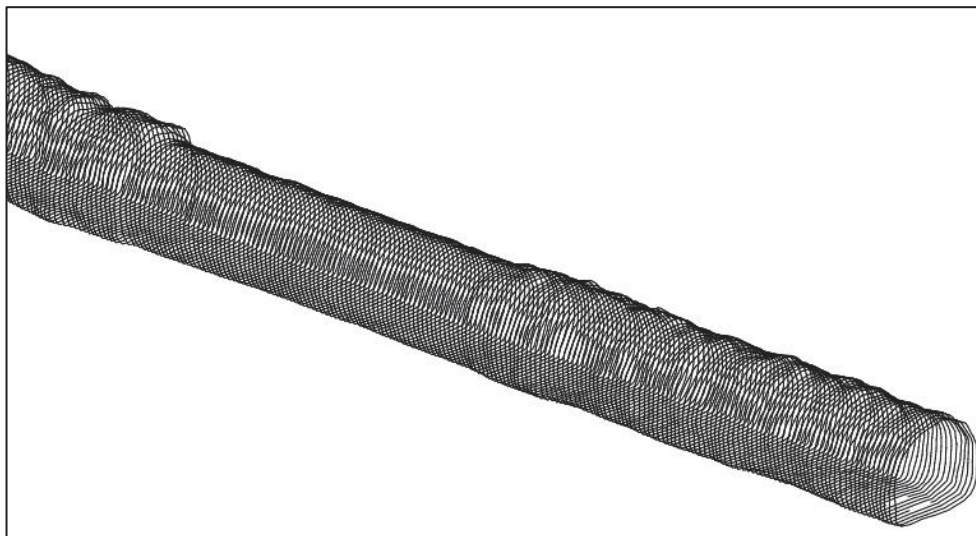
FONTE: O Autor (2018).

A segunda parte da altura de rugosidade total é composta pela rugosidade de área, definida para um dado trecho com medições distantes de 0,5m a 1,0m, através da equação [33].

$$rms_a = 0,53 \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^r (A_j^{0,5} - \bar{A}^{0,5})}{r}} \quad [33]$$

Na FIGURA 6 está representado um trecho de medição de áreas de um túnel conforme o método IBA.

FIGURA 6 – MÉTODO IBA – ARRANJO TÍPICO DE MEDIÇÕES TRANSVERSAIS



FONTE: O Autor (2018).

Finalmente, a altura de rugosidade total do trecho de túnel analisado pode ser definida pela equação [34].

$$\varepsilon = rms_p + rms_a \quad [34]$$

Para todos os métodos que definem somente a altura de rugosidade ε , o fator de atrito f é calculado através da equação [10].

2.3 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

Os principais estudos relacionados à composição de rugosidades estão ligados diretamente ao estudo de canais abertos. Um grande número de equações foi proposto ao longo dos anos, onde podem ser agrupadas em três grupos característicos em função das variáveis utilizadas no cálculo (YEN, 2002).

O primeiro grupo utiliza a área relativa da subseção em conjunto com sua rugosidade relativa. No entanto, para utilizar este método é necessário subdividir a área total do circuito em subseções de acordo com as parcelas diferentes de rugosidade.

O segundo grupo utiliza somente o perímetro molhado de cada rugosidade, sem levar em conta como se dividem as subáreas. Já o terceiro e último grupo utiliza tanto o perímetro molhado de cada rugosidade quanto o raio hidráulico. Portanto, este grupo depende tanto da forma como são feitas as divisões de área quanto do

perímetro molhado de cada rugosidade. Ressalta-se ainda que as diferenças entre estes equacionamentos superam em grande escala o efeito de divisão em subáreas, o que implica que deve se considerar com maior cautela qual equação será utilizada na determinação da rugosidade ponderada (YEN, 2002).

No entanto, apesar de existirem estudos relativos a esta área que datam do começo do século passado, não existe um consenso sobre qual método traz o resultado mais próximo da realidade. Adicionalmente, por se tratar de um estudo que foi feito inicialmente em canais abertos os coeficientes de rugosidade adotados são baseados no coeficiente de *Manning*, conforme definido na equação [12]. Desta maneira apresenta-se na sequência, dentre todas as equações apresentadas por Yen, aquelas mais frequentemente utilizadas.

A equação [35] trata de uma *média ponderada* do perímetro molhado, que apresenta uma proporção linear de cada altura de rugosidade com seu respectivo perímetro molhado (YEN, 2002).

$$n_{mp} = \frac{\sum(n_i.P_i)}{P} \quad [35]$$

A equação [36], proposta por *Pavlovskii* (1931), apresenta a força de resistência total como sendo a soma de todas as forças de resistências de cada subárea (YEN, 2002).

$$n_{pavlovskii} = \left[\frac{\sum(n_i^2.P_i)}{P} \right]^{1/2} \quad [36]$$

A equação [37], proposta por *Horton* (1933) e *Einstein* (1934), se baseia na hipótese de que a velocidade média da seção deve ser igual às velocidades médias das subáreas (YEN, 2002).

$$n_{einstein} = \left[\frac{\sum(n_i^{3/2}.P_i)}{P} \right]^{2/3} \quad [37]$$

Em continuação, de maneira a realizar a análise em um túnel pressurizado adota-se o equacionamento de *Darcy-Weisbach*. Para determinar a relação entre os coeficientes de rugosidade é utilizada a equação [14].

Adicionalmente aos estudos propostos para canais abertos, alguns autores também apresentaram relações para circuitos pressurizados. Segundo *Solvik* (1988), o equacionamento que oferece os melhores resultados para túneis com piso

revestido e paredes e teto ásperos é aquele apresentado por *Einstein* (1934), conforme pode ser visto na equação [37] (BISHWAKARMA, 2013). No entanto, de maneira a ser utilizada no equacionamento proposto por *Darcy-Weisbach* a formulação proposta por *Horton* (1933) e *Einstein* (1934) é reescrita conforme apresentado na equação [38].

$$f_{einstein} = \frac{\sum(f_i \cdot P_i)}{P} \quad [38]$$

Outro autor que estudou túneis com rugosidade composta foi *Elfman* (1993), que propôs que a força cortante total é resultante da soma das forças cortantes em cada subárea (CASTRO, 2007). Este método requer determinar todas as subáreas, como definido para o terceiro tipo apresentado anteriormente. A equação [39] determina o valor do coeficiente de rugosidade composta conforme o método de *Elfman* (1993).

$$f_{elfman} = \frac{A^{3/2}}{P^{1/2} \cdot \sum \left(\frac{A_i^{3/2}}{P_i^{1/2} \cdot f_i^{1/2}} \right)} \quad [39]$$

No entanto, este equacionamento requer um método iterativo de maneira a determinar o valor do coeficiente de rugosidade, onde para determinar as subáreas do trecho estudado deve-se resolver a igualdade apresentada na equação [40].

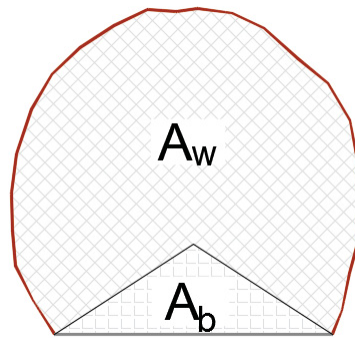
$$\sqrt{\frac{A_b}{P_b}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_b}} + \frac{3,75}{\sqrt{8}} \right) = \sqrt{\frac{A_w}{P_w}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_w}} + \frac{3,75}{\sqrt{8}} \right) \quad [40]$$

Onde:

- A_b é a subárea relativa ao piso [m²];
- P_b é o perímetro médio do piso no trecho [m];
- f_b é o coeficiente de rugosidade do piso;
- A_w é a subárea relativa a parede/teto [m²];
- P_w é o perímetro médio da parede/teto no trecho [m];
- f_w é o coeficiente de rugosidade da parede/teto no trecho.

Um exemplo de divisão das subáreas é apresentado no desenho esquemático da FIGURA 7.

FIGURA 7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA DIVISÃO DAS SUBÁREAS DE UMA SEÇÃO DE TÚNEL



FONTE: O Autor (2018).

Considerando que a soma das subáreas é a área média do trecho, estima-se inicialmente uma das subáreas e iterativamente atinge-se a igualdade da equação [40], definindo-se então as respectivas subáreas.

2.4 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

As perdas de carga localizadas são definidas com base na equação [5] proposta por *Darcy-Weisbach*. No entanto adota coeficientes experimentais, aqui definidos como ζ , no lugar da relação formada pelo fator de atrito, comprimento e diâmetro hidráulico, conforme demonstrado pela equação [41].

$$h_f = \zeta \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad [41]$$

2.4.1 Grades

O primeiro item a ser definido como uma perda localizada no circuito de adução é a grade, localizada na face de entrada da tomada d'água. O coeficiente de perda de carga da mesma é definido conforme a equação [42] (LEVIN, 1968).

$$\zeta_1 = K_d \cdot K_f \cdot p^{1,6} \cdot \left(8 + 2,3 \cdot \frac{L}{b} + 2,4 \cdot \frac{b}{L} \right) \cdot \sin \theta \quad [42]$$

Onde:

- K_d é o coeficiente de acumulação de detritos, usualmente adotando um valor de 1,2 para grades modernas com sistemas de limpeza;
- K_f é o coeficiente de formato das barras da grade, conforme abaixo:

- $K_f = 0,51$ para grades de seção retangular;
- $K_f = 0,35$ para grades de seção circular;
- $K_f = 0,321$ para grades de seção retangular com pontas arredondadas.
- p é a relação entre área livre e bloqueada pela grade;
- θ é o ângulo do paramento em relação ao plano horizontal;
- L é o comprimento da barra no sentido do fluxo [m];
- b é a espessura da barra [m].

2.4.2 Tomadas de Água

Na sequência, a adução da tomada d'água é considerada uma entrada elíptica otimizada, conforme sugerido por *Levin* (LEVIN, 1968). Os valores do coeficiente ζ_2 variam entre 0,01 e 0,02, onde usualmente se utiliza o valor maior. A velocidade para o cálculo da perda de carga é determinada na seção de menor área de passagem de água na tomada. Cabe ressaltar ainda que as perdas contínuas são calculadas com base no comprimento da tomada, e na velocidade e perímetro determinados na seção de menor área de passagem.

2.4.3 Ranhuras

Ainda na tomada d'água, outra perda localizada considerada são as ranhuras de comportas. O coeficiente é determinado conforme equação [43] (LEVIN, 1968).

$$\zeta_3 = n \cdot \left(\frac{\sigma^{1,8} - 1}{1,43 \cdot \sigma^{1,8} + 1} \right)^2 \cdot \sin \gamma \quad [43]$$

Onde:

- n é o número de ranhuras na tomada d'água;
- γ é o ângulo da parede da ranhura em relação ao fluxo;

O coeficiente σ é determinado conforme equação [44] (LEVIN, 1968).

$$\sigma = \frac{S + 0,25 \cdot L \cdot b}{S} \quad [44]$$

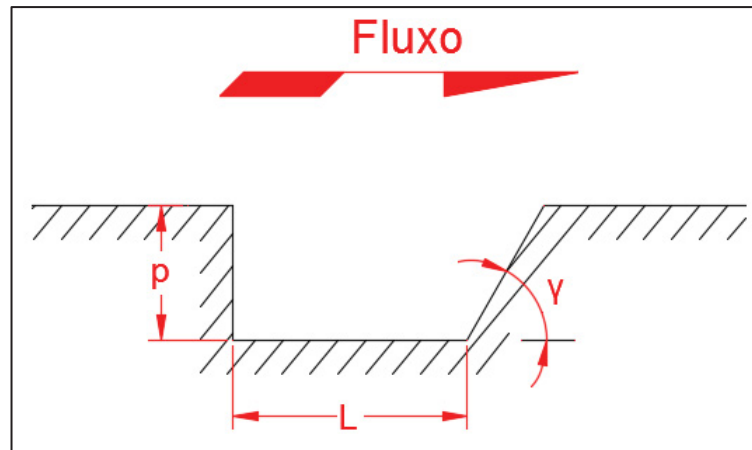
Onde:

- S é a área da seção transversal na região da ranhura na tomada [m²];

- L é a largura da ranhura [m];
- b é o comprimento ou perímetro da ranhura na seção da tomada [m].

Na FIGURA 8 está representado um desenho esquemático com as principais dimensões consideradas na ranhura.

FIGURA 8 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA RANHURA E SUAS DIMENSÕES



FONTE: O Autor (2018).

O coeficiente de ranhuras também é utilizado como uma aproximação para determinar as perdas localizadas na aeração da comporta e nos “rock-traps” ao longo do túnel de adução.

2.4.4 Contrações

Para transições de seções no formato de contrações cônicas, o coeficiente de perda de carga localizado pode ser aproximado através da equação [45] (RENNELS e HUDSON, 2012).

$$\zeta_{4'} = K_{acc} \cdot \lambda^2 + (\lambda - 1)^2 \quad [45]$$

Onde as variáveis K_{acc} e λ são definidas conforme equações [46] e [47] respectivamente.

$$K_{acc} = 0,0696 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \right)^5 \right) \quad [46]$$

Onde:

- α é o ângulo interno total da contração;
- S_n é a área de entrada para $n = 1$, e saída para $n = 2$ [m²].

$$\lambda = 1 + 0,622 \cdot \left(\frac{\alpha}{180}\right)^{4/5} \cdot \left(1 - 0,215 \cdot \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}}\right)^2 - 0,785 \cdot \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}}\right)^5\right) \quad [47]$$

As perdas contínuas da contração também podem ser aproximadas através de um coeficiente de perda de carga, determinado conforme equação [48], onde a variável f é o fator de atrito definido na seção de saída da contração (RENNELS e HUDSON, 2012).

$$\zeta_{4''} = \frac{f \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{S_2}{S_1}}\right)^4\right)}{8 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad [48]$$

Desta maneira, a perda de carga total da contração é calculada conforme equação [49], onde a velocidade é definida na saída da contração.

$$h_{f-4} = (\zeta_{4'} + \zeta_{4''}) \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad [49]$$

2.4.5 Passagens por recessos e acessos

Para os nichos de passagem, janelas de acesso fechadas e a passagem pela chaminé de equilíbrio, considerou-se a passagem por uma bifurcação em T, porém sem fluxo na saída lateral. Desta maneira, adota-se a equação [50] para determinar o respectivo coeficiente de perda de carga localizada (RENNELS e HUDSON, 2012).

$$\zeta_5 = 1 - 0,95 \cdot \frac{Q_2^2}{Q_1^2} - 2 \cdot C_{xC} \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1} - \frac{Q_2^2}{Q_1^2}\right) - 2 \cdot C_M \cdot \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \quad [50]$$

No entanto, como os índices 1 e 2 são relativos à seção de passagem, as vazões Q_1 e Q_2 são iguais. Portanto a equação [43] pode ser substituída diretamente pelo valor resultante da diferença entre o primeiro e segundo termos da equação.

$$\zeta_5 = 1 - 0,95 = 0,05 \quad [51]$$

Cabe ressaltar que o autor desta formulação traz que a influência da relação entre áreas de passagem e lateral é virtualmente nula, onde a maior influência está na curvatura da junção entre o trecho de passagem e trecho lateral.

2.4.6 Curvas

Para as curvas ao longo do túnel, foram calculadas somente as perdas localizadas, onde as perdas contínuas são consideradas como trechos retilíneos com seu comprimento adotado a partir do arco da curva ao longo do eixo. Nas curvas em trechos de concreto moldado ou aço são calculados tanto as perdas localizadas quanto as contínuas, que são determinadas em função de seu comprimento.

Para determinar as perdas localizadas foi adotada a equação [52] (IDELCHIK, 2008).

$$\zeta_6 = k_{\Delta} \cdot k_{Re} \cdot A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \quad [52]$$

Onde:

- k_{Δ} é um coeficiente definido em função da rugosidade relativa, onde para $\frac{\varepsilon}{D} \geq 0,001$ seu valor se aproxima de 2,0;
- k_{Re} é um coeficiente definido em função do número de Reynolds, onde para $Re \geq 4 \times 10^5$ seu valor é 1,0;
- A_1 é um coeficiente definido em função do ângulo δ da curva, onde:
 - o Para $\delta \leq 70^\circ \rightarrow A_1 = 0,9 \cdot \sin \delta$
 - o Para $\delta = 90^\circ \rightarrow A_1 = 1,0$
 - o Para $\delta \geq 100^\circ \rightarrow A_1 = 0,7 + 0,35 \cdot \frac{\delta}{90^\circ}$
- B_1 é um coeficiente definido em função da razão raio de curvatura e diâmetro hidráulico do túnel, onde:
 - o Para $R/D_h \leq 1 \rightarrow B_1 = 0,21 \cdot \left(\frac{R}{D_h}\right)^{-2,5}$
 - o Para $R/D_h \geq 1 \rightarrow B_1 = 0,21 \cdot \left(\frac{R}{D_h}\right)^{-0,5}$
- C_1 é um coeficiente definido em função da relação largura e altura da seção, onde para seções próximas a quadradas e circulares adota-se o valor 1,0.

2.4.7 Expansões

As transições de seções em formato de expansões cônicas têm seu coeficiente de perda de carga localizada definido conforme a equação [53] (RENNELS e HUDSON, 2012).

$$\zeta_{7'} = K_L \cdot (1 - \beta^2)^2 \quad [53]$$

Onde:

- β é a relação entre diâmetro de entrada (1) e saída (2) da expansão:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_1}{A_2}}$$

- K_L é um coeficiente que varia em função do ângulo interno da expansão α [graus] e da relação β , conforme segue:

- Para $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ e $0 \leq \beta \leq 1$:

$$K_L = 8,3 \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right)^{1,75}$$

- Para $20^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ e $0 \leq \beta \leq 0,5$:

$$K_L = \left\{ 1,366 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (\alpha - 15^\circ)}{180} \right]^{1/2} - 0,17 - 3,28 \cdot (0,0625 - \beta^4) \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 20^\circ}{40^\circ}} \right\}$$

- Para $20^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ e $0,5 \leq \beta \leq 1$:

$$K_L = \left\{ 1,366 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (\alpha - 15^\circ)}{180} \right]^{1/2} - 0,17 \right\}$$

- Para $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ e $0 \leq \beta \leq 0,5$:

$$K_L = \left[1,205 - 3,28 \cdot (0,0625 - \beta^4) - 12,8 \cdot \beta^6 \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 60^\circ}{120^\circ}} \right]$$

- Para $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ e $0,5 \leq \beta \leq 1$:

$$K_L = \left[1,205 - 0,2 \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 60^\circ}{120^\circ}} \right]$$

As perdas contínuas da contração são também aproximadas através de um coeficiente de perda de carga, determinado conforme equação [54] (RENNELS e HUDSON, 2012).

$$\zeta_{7''} = \frac{f \cdot (1 - \beta^4)}{8 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad [54]$$

Desta maneira, a perda de carga total da expansão é calculada conforme equação [55], onde a velocidade é definida na seção de entrada (1) da expansão.

$$h_{f_7} = (\zeta_{7'} + \zeta_{7''}) \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \quad [55]$$

2.4.8 Bifurcações (*wye-branch*)

A bifurcação considerada é de tipo padronizado, usualmente construídas em chapas de aço reforçado. O coeficiente de perda de carga localizado é definido em função da relação de velocidades de saída e entrada, conforme equação [56] (IDELCHIK, 2008).

$$\zeta_8 = 0,28 - 0,9 \cdot \frac{V_2}{V_1} + 0,955 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - 0,157 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \quad [56]$$

A perda de carga é calculada com base na velocidade de entrada (V_1) da bifurcação.

2.4.9 Válvulas

Ao final do circuito de adução estudado estão instaladas válvulas esféricas para proteção do conduto forçado. Considerando que as mesmas possuem praticamente passagem plena, não foi considerada qualquer perda de carga localizada nos cálculos relativo as válvulas esferas.

2.5 FATOR DE CORREÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA

Com base no trabalho realizado para o túnel de desvio de Nova Ponte, é possível utilizar uma equação para determinar o fator de correção de energia cinética α em seções circulares (OTA, MODENESI e CARNEIRO, 1993). Outros trabalhos também foram elaborados para esta determinação do fator de correção, porém por tratarem de seções arco-retangulares não foram aplicadas nesta dissertação (FABIANI, OLINGER e TOZZI, 1996).

A equação proposta no trabalho do desvio de Nova Ponte possui como parâmetros de entrada apenas o coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach e a constante de Von Karman para tubos, conforme apresentado a seguir:

$$\alpha = 1 + 0,384 \cdot \left(\frac{f}{8k^2}\right)^{1/2} + 3,8 \cdot \left(\frac{f}{8k^2}\right) - 1,77 \cdot \left(\frac{f}{8k^2}\right)^{3/2} \quad [57]$$

O valor da constante de Von Karman, k , adotado pelo autor é de 0,40.

Este fator possui aplicação direta na equação de Bernoulli, que nesse trabalho foi utilizado em conjunto com as medições de pressão na entrada da caixa espiral da turbina para a determinação da vazão turbinada (método de Winter-Kennedy). A equação [58] apresenta a aplicação deste fator na determinação do nível de água montante (NAM) na entrada da turbina.

$$NAM = \frac{p_{ent}}{g} + NA_{piez} + \alpha \cdot \frac{v_{ce}^2}{2 \cdot g} \quad [58]$$

Onde:

- p_{ent} é a pressão manométrica medida na entrada da caixa espiral [mca];
- NA_{piez} é a elevação em metros do piezômetro [msnm];
- v_{ce} é a velocidade média na entrada da caixa espiral [m/s];

Considerando que esta correção será aplicada na seção de medição de pressão, junto à entrada da caixa espiral da turbina, o fator de atrito f para a determinação do fator de correção de energia cinética será calculado conforme equação [10] com o valor de altura de rugosidade apresentado na TABELA 1.

3 MATERIAIS E METODOLOGIAS

O objetivo principal deste trabalho é definir qual o melhor método que combina a estimativa de rugosidade de rocha de túneis e a composição de rugosidades de rocha e concreto em seções planas para casos similares ao estudado neste trabalho. Para chegar a tal objetivo foram utilizadas medições de seções transversais e longitudinais obtidas do escaneamento a laser do túnel de adução da central hidroelétrica Chaglla, localizada no Peru.

Partindo desses dados coletados e posteriormente tratados, são aplicados diversos métodos matemáticos que em sua totalidade utilizam-se das seções transversais do túnel.

Dessa maneira, para se chegar aos valores de rugosidade calculados neste trabalho, foi adotada a seguinte metodologia:

1. através de um escaneamento completo a laser do túnel, que fornece um modelo tridimensional de faces triangularizadas, obter as seções longitudinais e transversais ao longo do túnel;
2. a partir das informações brutas obtidas nas medições, realizar o tratamento das seções que apresentaram piso inacabado via AutoCAD® e, com as seções tratadas, aplicar rotina criada no próprio software para determinação das áreas, perímetros e distâncias longitudinais ao longo do túnel;
3. através dos diferentes métodos apresentados no item 2.2, realizar a análise matemática para obtenção das rugosidades de rocha dos diversos trechos de túnel em análise. Em conjunto com esta análise, comparam-se diferentes métodos de composição de rugosidades para o perfil de túnel adotado, com parede e abóboda em rocha tratada e piso em concreto compactado;
4. finalmente, realizam-se as análises dos resultados comparando-os com valores de perda de carga obtidos através de medição em campo, de maneira indireta, com vazões medidas pelo método de Winter-Kennedy (ver Anexo A).

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO TÚNEL DE ADUÇÃO

O túnel de adução se localiza em área de rochas calcárias compostas em sua maioria por calcários de coloração cinza escuro a pretos. São rochas bem estratificadas formando camadas delgadas, geralmente muito fraturada. Em alguns setores foram encontradas camadas de arenito esbranquiçadas e camadas silte argilosas avermelhadas, assim como brechas carbonáticas.

As rochas em geral mostraram bom comportamento geotécnico, no entanto, em alguns setores muito fraturados com forte infiltração de água exigiram maiores tratamentos e dificultaram o avanço da escavação. A carsticidade, muito comum neste tipo de rochas, foi pouco pronunciada e foi contornada durante a escavação.

O circuito de geração da usina de Chaglla inicia-se com uma tomada de água em concreto que transiciona para o trecho mais longo do circuito, composto pelo túnel de adução. Ao final do túnel há um trecho de transição formado por uma blindagem revestida por concreto, com aproximadamente 270 metros, aflorando num conduto exposto (FIGURA 9). Neste trecho exposto o conduto é bifurcado em dois circuitos individuais, que passam por válvulas esféricas e descem por uma encosta com declividade de 1,5H:1V até entrar na casa de força. Cada trecho de conduto individual possui aproximadamente 280 metros de comprimento.

FIGURA 9 – FOTO DO TRECHO EXPOSTO DO CIRCUITO DE GERAÇÃO DURANTE CONSTRUÇÃO



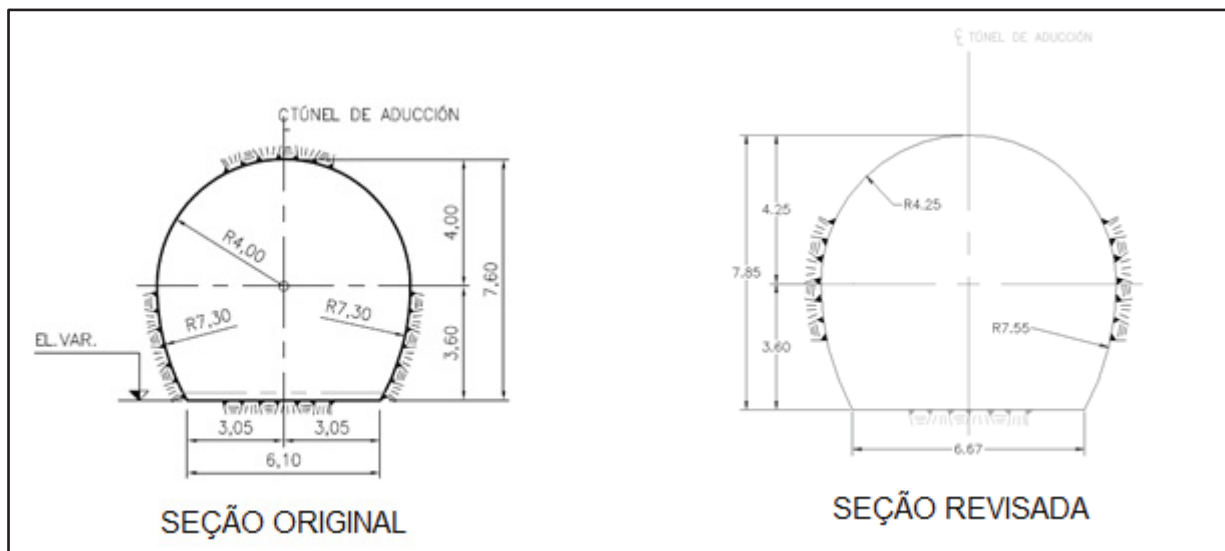
FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2015).

O túnel de adução por sua vez possui um comprimento total de escavação de 14.353m, sendo dividido em 8 frentes de escavações distintas com 5 janelas de acesso e uma saída para a chaminé de equilíbrio. Foi projetado para aduzir a vazão turbinada total da usina, de $150\text{m}^3/\text{s}$, com um critério de velocidade máxima de $3,5\text{m/s}$. Além deste limite superior, que garantirá a operação das duas unidades geradoras, o valor mínimo aduzido pelo túnel fornecerá a vazão para a operação parcial de uma unidade geradora, com um valor aproximado de $30\text{m}^3/\text{s}$.

O perfil de escavação adotado para o túnel foi uma seção do tipo arco-ferradura, escavada através do método *Drill & Blast* (D&B), onde na fase de projeto e início das escavações adotou-se um diâmetro de abóbada de 8,00m com altura de 7,60m. Após as primeiras escavações verificou-se a necessidade de aumentar a área da seção transversal, sendo então adotado um diâmetro de abóbada de 8,50m

e altura de 7,85m para os trechos com melhor qualidade de rocha. Estas seções de escavação são mostradas na FIGURA 10.

FIGURA 10 – SEÇÕES TÍPICAS DO TÚNEL DE ADUÇÃO ANALISADO



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2016).

As paredes e abóbadas de todo túnel tiveram um tratamento superficial, resultando em uma superfície de rocha com aplicação de concreto projetado. De maneira a simplificar a nomenclatura ao longo deste trabalho, as abóbadas e paredes do túnel terão sua superfície referenciada apenas como rocha tratada (FIGURA 11).

FIGURA 11 – FOTO DE APLICAÇÃO DE CONCRETO PROJETADO NO TÚNEL DE ADUÇÃO



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Em conjunto com o tratamento de rocha foi aplicado um revestimento de concreto no piso (FIGURA 12), com uma espessura mínima de 25cm, resultando nas características apresentadas na TABELA 3.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DAS SEÇÕES DO TÚNEL DE ADUÇÃO

	SEÇÃO ORIGINAL	SEÇÃO REVISADA
ÁREA [m ²]	50,2	55,1
PERÍMETRO MOLHADO [m]	25,9	27,2
PERÍMETRO DE ABÓBADA E PAREDES [m]	19,5	20,3
PERÍMETRO DO PISO [m]	6,4	6,9
RAIO HIDRÁULICO [m]	1,94	2,03
DIÂMETRO HIDRÁULICO [m]	7,75	8,10
VELOCIDADE NOMINAL [m/s]	2,99	2,72
VELOCIDADE MÍNIMA [m/s]	0,60	0,54
Nº Re MÁXIMO	2,32E+07	2,11E+07
Nº Re MÍNIMO	4,63E+06	4,22E+06

FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

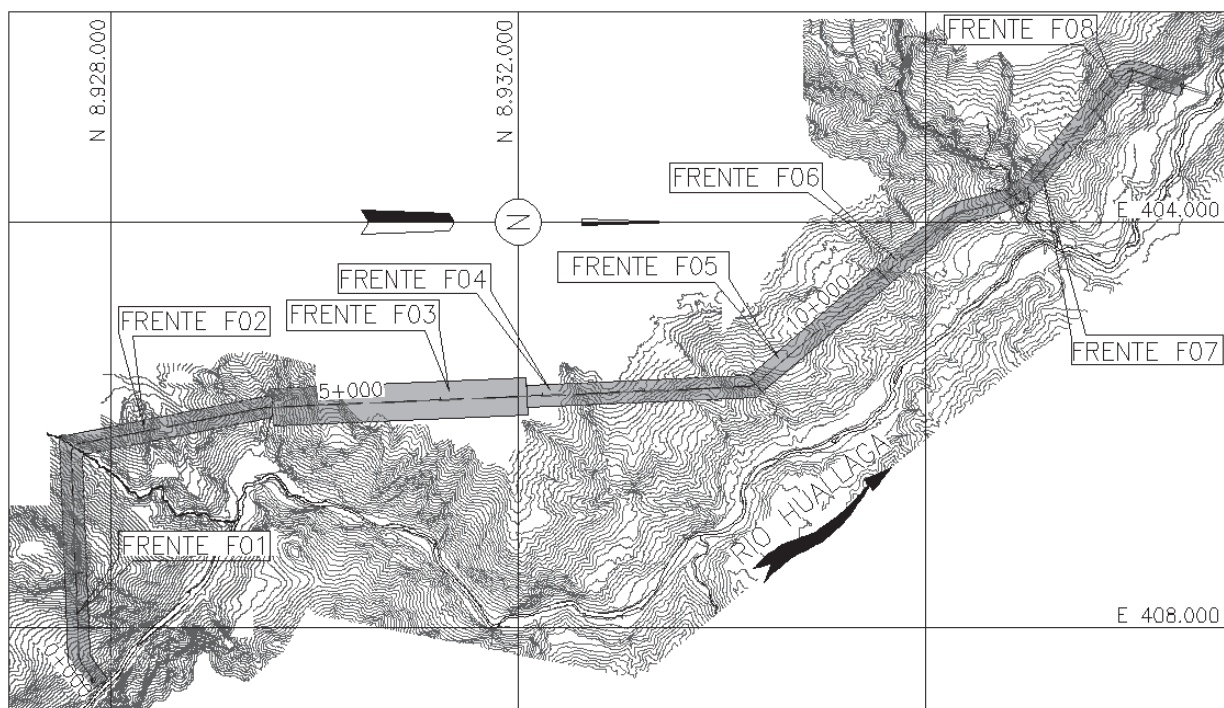
FIGURA 12 – FOTO DO TÚNEL COM PISO DE CONCRETO ACABADO



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

O traçado e alinhamento das 8 frentes de escavação ao longo dos aproximadamente 14km de túnel são apresentados na FIGURA 13.

FIGURA 13 – TRAÇADO DAS FRENTES DE ESCAVAÇÃO DO TÚNEL



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Esta subdivisão do túnel em diversas frentes de escavação possui função construtiva, de maneira a agilizar a escavação e terminar a obra num prazo aceitável. Estas frentes são definidas de acordo com o estaqueamento, e apresentadas na TABELA 4.

TABELA 4 – FRENTES DE ESCAVAÇÃO DO TÚNEL DE ADUÇÃO DE CHAGLLA

FRENTES	ESTACAS		COMPRIMENTO [m]
	De	Até	
01	0+126	1+899	1 774
02	1+900	4+343	2 444
03	4+344	6+732	2 389
04	6+733	9+119	2 387
05	9+120	10+998	1 879
06	10+999	12+083	1 085
07	12+084	12+528	445
08	12+529	14+478	1 950
COMPRIMENTO TOTAL:			14 353

FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Dentro destas frentes de escavação, em alguns trechos foram necessários tratamentos mais extensivos, chegando inclusive a pontos onde foi necessária a adoção de trechos em concreto moldado e blindagem, principalmente devido às

condições geológicas locais. São três os pontos principais que receberam esse tratamento extensivo: Quebrada Lluto, Quebrada Chimao e o trecho final do túnel que faz a transição para o conduto forçado exposto. Um resumo do estaqueamento desses trechos é apresentado na TABELA 5.

TABELA 5 – TRECHOS DE TÚNEL COM CONCRETO MOLDADO E BLINDAGEM

LOCAL	Estaca Inicial	Estaca Final	Comprimento [m]
<i>Quebrada Lluto</i>	2+252	2+426	175
<i>Quebrada Chimao</i>	11+957	12+984	1 028
<i>Transição Túnel-Conduto</i>	14+222	14+478	257

FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Além desse tratamento extensivo, alguns trechos também necessitaram de tratamentos locais com o uso de cintas metálicas de proteção para a aplicação de injeções e camadas maiores de concreto em função da qualidade da rocha, o que levou a uma maior variação de área ao longo do túnel e, em consequência, um aumento da perda de carga (FIGURA 14). Como esta constatação foi verificada durante o início das escavações, o empreiteiro tomou a decisão de aumentar a seção de escavação de alguns trechos do túnel, o que resulta numa diminuição da velocidade do fluxo e, consequentemente, da perda de carga.

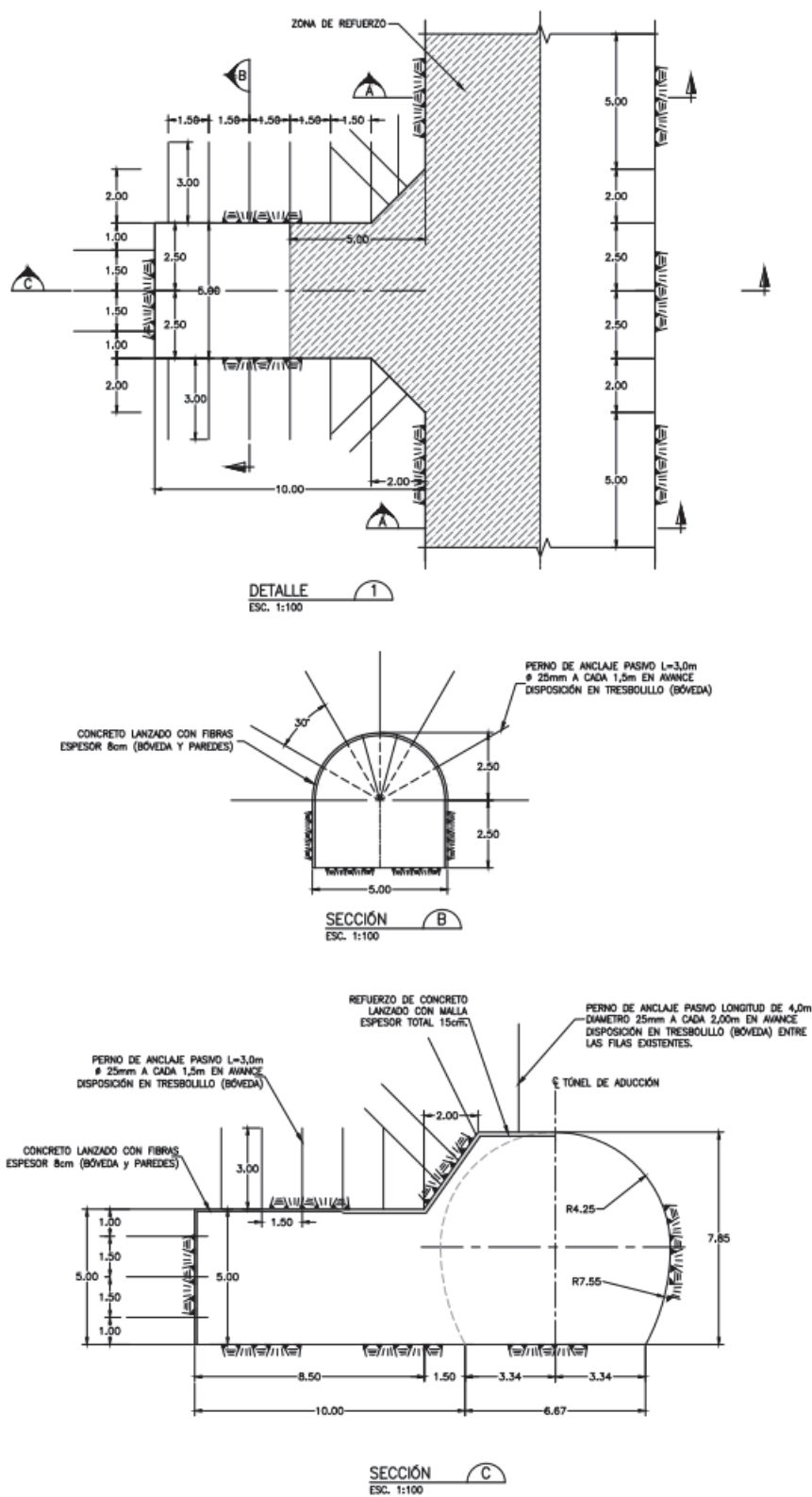
FIGURA 14 – FOTO DA APLICAÇÃO DE CONCRETO COM CINTA METÁLICA DE PROTEÇÃO



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Finalmente, para permitir a circulação e acesso de equipamentos no túnel, foram escavados diversos nichos de manobra e 5 janelas de acesso ao longo das frentes de escavação. Os detalhes desses nichos são apresentados na FIGURA 15.

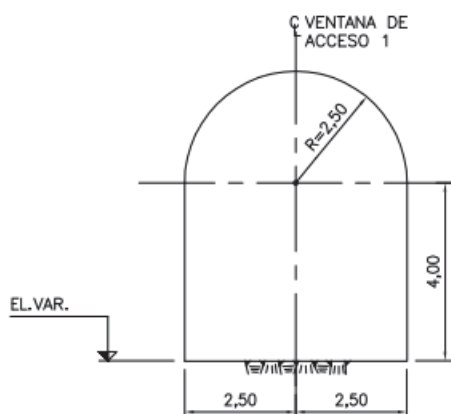
FIGURA 15 – DIMENSÕES DE PROJETO DOS NICHOS DE MANOBRA



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

As janelas de acesso possuem geometria similar aos nichos de manobra na junção com o túnel, porém apresentam uma seção transversal distinta, conforme demonstrado na FIGURA 16.

FIGURA 16 – SEÇÃO TÍPICA DAS JANELAS DE ACESSO



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

Os pontos onde estas janelas foram locadas ao longo do túnel foram definidos de maneira a permitir um acesso facilitado de todas as frentes de escavação, distribuindo-os com um comprimento tal que as escavações avancem conjuntamente.

Ao final do túnel, aproximadamente na estaca 14+000 m, está localizada a entrada para a chaminé de equilíbrio, cuja seção de entrada possui dimensões idênticas às das janelas de acesso apresentadas na FIGURA 16.

Mais detalhes do túnel, incluindo as curvas e posições dos nichos e janelas, são apresentados no APÊNDICE B – PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS E ADICIONAIS.

3.2 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS

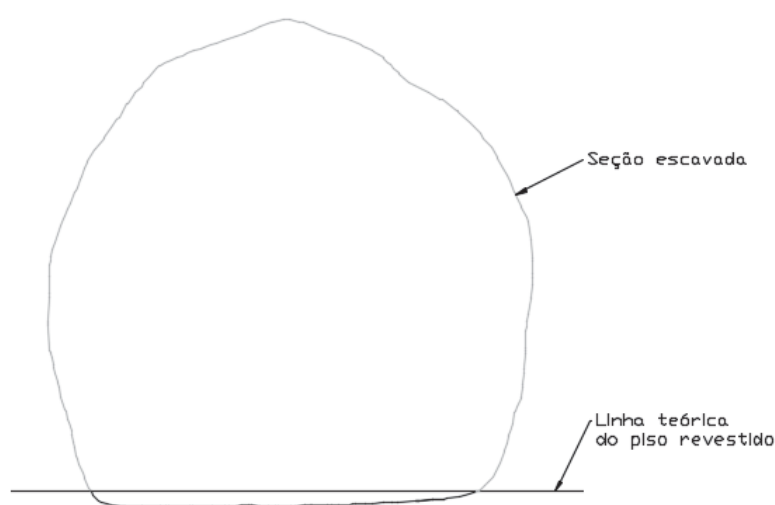
Inicialmente, seções transversais foram obtidas do túnel através de medições topográficas, ao longo do período de escavação do mesmo. Posteriormente, próximo da conclusão da escavação, optou-se por realizar um escaneamento a laser do túnel completo. Esse escaneamento forneceu uma superfície de triângulos irregulares, modelando tanto a abóbada e paredes quanto o piso. Contudo, apesar do escaneamento ter sido realizado junto a conclusão das

escavações, o piso não havia sido completamente finalizado em diversos trechos, apresentando assim uma camada de material de recobrimento (rachão) cuja função principal é fornecer uma pista de rolamento para os equipamentos durante a construção.

Considerando que todos os métodos apresentados no item 2.2 utilizam seções transversais do túnel e, adicionalmente, o método *IBA* utiliza também seções longitudinais, foram desenvolvidas ferramentas e rotinas dentro do *software* de edição tridimensional AutoCAD® para retirar essas seções conforme necessário.

As seções transversais foram extraídas num intervalo de 0,50m, garantindo assim o critério de análise do método *IBA*. Ainda assim, levando-se em conta os trechos de túnel com o piso inacabado, diversas seções foram manualmente ajustadas para respeitar a linha de projeto do piso revestido em concreto, conforme exemplo da FIGURA 17.

FIGURA 17 – SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA OBTIDA ATRAVÉS DO SOFTWARE



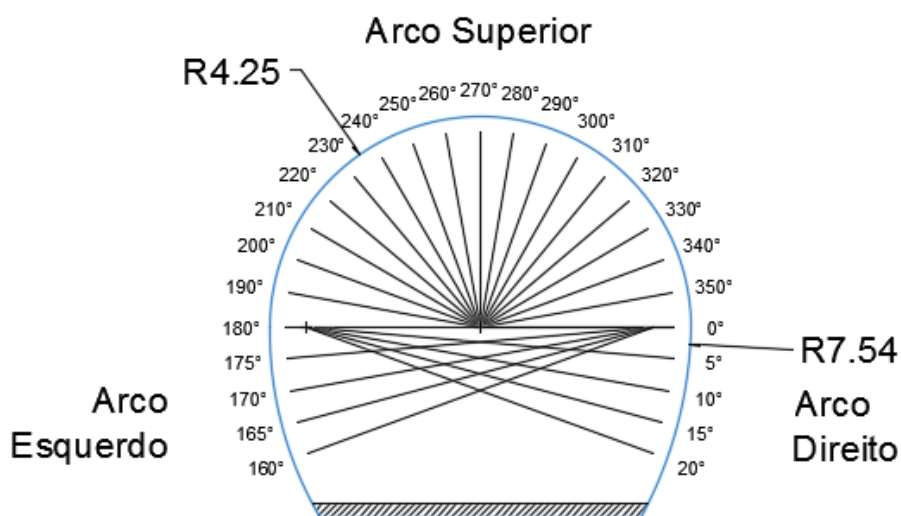
FONTE: O autor (2017).

As seções longitudinais, extraídas paralelamente ao eixo do túnel, demandam certo cuidado com relação ao alinhamento deste eixo teórico quando aplicado no modelo tridimensional. O eixo de escavação real nem sempre conseguiu respeitar o eixo teórico, resultando em pequenos desvios que foram corrigidos conforme se avançou na escavação do túnel. No entanto, ao extrair estas seções, estes desvios podem representar uma grande diferença nos valores de rugosidade

obtidos pelo método IBA, adicionando uma altura de rugosidade proporcional ao desalinhamento. Desta maneira, os trechos que apresentaram este desalinhamento tiveram o eixo de escavação devidamente ajustados a fim de minimizar este acréscimo na altura de rugosidade.

O posicionamento das seções longitudinais extraídas em relação ao eixo de escavação é apresentado na FIGURA 18.

FIGURA 18 – POSICIONAMENTO DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS



FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2016).

Destaca-se que não foram extraídas seções longitudinais do piso, pois no local do mesmo está sendo considerado um revestimento plano em concreto que deve respeitar as elevações do projeto.

Em continuação ao tratamento e separação das seções para análise, alguns trechos do túnel foram removidos por apresentarem discontinuidades que caracterizam perdas localizadas. Estes trechos, descritos no item 3.1, são aqueles que apresentaram transições em concreto moldado e blindagem, nichos de manobra e janelas de acesso. Além destes trechos, a Frente 07 foi totalmente removida dessa análise por se tratar de um trecho unicamente revestido em concreto e blindagem.

Com todas as seções transversais e longitudinais de cada frente de escavação devidamente tratadas e separadas, partiu-se então para a subdivisão das frentes de escavação em função das características construtivas de cada trecho, seja pela seção de escavação adotada ou pelo tipo de tratamento aplicado. Esta

subdivisão foi realizada com base em dados de projeto, em conjunto com uma análise visual da variação de área ao longo das frentes.

As seções já separadas de cada frente são apresentadas na TABELA 6.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS DE ESCAVAÇÃO

TRECHO	ESTACAS		COMPRIMENTO [m]	SEÇÃO NOMINAL
	De	Até		
Frente 01 (a)	0+137	1+572	1 435	Seção revisada
Frente 01 (b)	1+573	1+899	326	Seção revisada
Frente 02 (a)	1+900	2+203	303	Seção revisada
Frente 02 (b)	2+204	2+242	38	Seção original
Frente 02 (c)	2+436	2+529	93	Seção revisada
Frente 02 (d)	2+530	2+700	170	Seção original
Frente 02 (e)	2+701	2+815	114	Seção revisada
Frente 02 (f)	2+816	2+963	147	Seção original
Frente 02 (g)	2+964	3+028	64	Seção revisada
Frente 02 (h)	3+029	3+149	120	Seção revisada
Frente 02 (i)	3+150	3+578	428	Seção original
Frente 02 (j)	3+579	4+343	764	Seção original
Frente 03 (a)	4+344	4+592	248	Seção original
Frente 03 (b)	4+593	4+627	34	Seção original
Frente 03 (c)	4+628	4+743	115	Seção original
Frente 03 (d)	4+744	4+785	41	Seção original
Frente 03 (e)	4+786	5+180	394	Seção original
Frente 03 (f)	5+181	5+280	99	Seção original
Frente 03 (g)	5+281	5+708	427	Seção revisada
Frente 03 (h)	5+709	5+751	42	Seção original
Frente 03 (i)	5+752	6+172	420	Seção revisada
Frente 03 (j)	6+173	6+246	74	Seção original
Frente 03 (k)	6+247	6+493	246	Seção revisada
Frente 03 (l)	6+494	6+557	64	Seção original
Frente 03 (m)	6+558	6+732	174	Seção revisada
Frente 04 (a)	6+733	7+274	541	Seção revisada
Frente 04 (b)	7+275	7+994	719	Seção revisada
Frente 04 (c)	7+995	8+450	455	Seção original
Frente 04 (d)	8+451	8+508	57	Seção original
Frente 04 (e)	8+509	8+865	356	Seção revisada
Frente 04 (f)	8+866	8+935	69	Seção original
Frente 04 (g)	8+936	9+119	183	Seção revisada
Frente 05 (a)	9+120	9+508	388	Seção original
Frente 05 (b)	9+509	9+918	409	Seção revisada
Frente 05 (c)	9+919	10+359	440	Seção revisada
Frente 05 (d)	10+360	10+499	139	Seção revisada
Frente 05 (e)	10+500	10+999	499	Seção revisada
Frente 06 (a)	11+000	11+048	48	Seção original
Frente 06 (b)	11+049	11+223	174	Seção revisada
Frente 06 (c)	11+224	11+237	13	Seção original
Frente 06 (d)	11+238	11+927	689	Seção revisada
Frente 06 (e)	11+928	11+957	29	Seção original
Frente 08 (a)	12+983	13+126	143	Seção revisada
Frente 08 (b)	13+127	13+459	332	Seção original
Frente 08 (c)	13+460	13+516	56	Seção original
Frente 08 (d)	13+517	14+222	705	Seção original

FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014).

As seções imediatamente a montante e a jusante de cada trecho foram descartados da análise por representarem transições que, posteriormente, foram incluídas no cálculo de perdas de carga localizada como transições bruscas.

Finalmente, com as seções transversais e longitudinais extraídas, tratadas e separadas em trechos, foram obtidas de cada seção transversal a área líquida e os perímetros totais, de rocha tratada e de piso em concreto. Destes dados foram realizadas as análises matemáticas para determinar as rugosidades da rocha tratada e rugosidades compostas dos diferentes trechos de túnel.

3.3 ANÁLISE MATEMÁTICA

A análise matemática foi separada nas seguintes etapas:

- a) definição das rugosidades de rocha tratada com base nos métodos apresentados no item 2.2;
- b) composição das rugosidades da abóbada e parede (rocha tratada) com a rugosidade do piso revestido (concreto), de acordo com os métodos apresentado no item 2.3, e cálculo das perdas de carga contínuas conforme item 2.1;
- c) cálculo das perdas de carga localizadas com base nos métodos e coeficientes apresentados no item 2.4;
- d) definição das diferentes perdas de carga teóricas totais através da soma das perdas contínuas com as perdas localizadas;
- e) através dos dados de operação da usina define-se uma equação de perda de carga medida no circuito de geração, definindo-se assim a perda de carga total para a vazão máxima turbinada que servirá de parâmetro para as análises.

3.3.1 Estimativa da Rugosidade de Rocha Tratada

A maioria dos métodos de estimativa de rugosidade de rocha tratada adota as áreas ou raios hidráulicos das seções transversais como dado de entrada. Como as seções já estão devidamente tratadas e definidas, a partir deste ponto são aplicados os métodos para obter os valores de rugosidade de cada trecho.

Contudo, boa parte dos métodos fornecem os valores da altura de rugosidade em metros, sendo necessário então calcular os valores do fator de atrito de *Darcy-Weisbach*. Este coeficiente, calculado conforme a equação [10], utiliza como variáveis de entrada a altura de rugosidade, o número de Reynolds no trecho e o diâmetro hidráulico. O número de Reynolds, também definido com base no

diâmetro hidráulico, depende que a velocidade do fluxo do trecho em análise seja calculada. Para tal, adotaram-se as médias das áreas e a vazão máxima turbinada de 150 m³/s. O diâmetro hidráulico é definido com base no raio hidráulico, obtido através da média dos raios calculados individualmente para cada seção.

Para os métodos que apenas fornecem o fator de atrito, realizou-se o cálculo inverso para determinar a altura de rugosidade. Este procedimento tem por finalidade apenas apresentar um valor de comparação às outras alturas, pois a perda de carga é calculada diretamente através do coeficiente de rugosidade de *Darcy-Weisbach*.

Finalmente, no método de cálculo de rugosidade de rocha tratada proposto por *Wright* (1971), não foi adotada a curva para determinar o coeficiente de rugosidade num túnel sem piso concretado. Ao invés disto, adotou-se diretamente a curva para determinar a rugosidade de um túnel com piso revestido em concreto.

3.3.2 Composição de Rugosidades

O primeiro passo na estimativa das rugosidades compostas foi a definição do valor de rugosidade do concreto. Partindo do valor de altura de rugosidade apresentado na TABELA 1 ($\varepsilon = 1,0mm$), determinou-se o valor do fator de atrito para cada trecho através da equação [10], adotando-se as áreas e raios hidráulicos médios e os valores de Reynolds, definidos de acordo com o método descrito no item 3.3.1. A partir deste valor foram calculados os coeficientes de *Manning* para concreto através da equação [14], novamente utilizando o valor de raio hidráulico médio.

Em paralelo foram determinados os coeficientes de rugosidade de rocha tratada no formato do coeficiente de *Manning*, mais uma vez utilizando os raios hidráulicos médios de cada trecho. Com os coeficientes de *Manning* de concreto e rocha tratada, e os perímetros médios da abóbada/parede e piso, foram calculados os fatores de atrito compostos conforme metodologias apresentadas no item 2.3.

Conjuntamente a estes cálculos, determinaram-se também os fatores de atrito para túneis com piso revestido de acordo com o método de *Wright* (1971).

Finalmente, com todos os dados disponíveis foram calculadas as perdas de carga unitárias, ou declividades, de cada método. Para tal adotou-se um valor de 1000m de túnel linear como referência, em conjunto com a vazão máxima turbinada

de $150\text{m}^3/\text{s}$ e a área média de cada trecho. A partir destas perdas unitárias foi possível então realizar uma análise comparativa entre os métodos de estimativa e composição de rugosidade.

3.3.3 Perdas Localizadas e Total

As perdas de carga localizadas ao longo do túnel, representadas por perdas em curvas, transições, etc, são determinadas conforme métodos definidos no item 2.4 e adicionadas às perdas de carga contínuas para determinar os valores de perda de carga total do circuito de geração. As perdas das transições entre os trechos de cada frente são calculadas como expansões ou contrações bruscas, utilizando a área média de cada trecho como parâmetro de cálculo.

Os pontos de perda localizada que se encontram ao longo dos trechos de túnel escavado adotam como parâmetros de entrada a área e perímetro médio daquele trecho. Para os pontos que possuem área e perímetro já definidos, como concreto moldado e blindagens, foram mantidos os valores de projeto.

Mais detalhes dos cálculos de perdas de carga localizadas são apresentados no APÊNDICE B – PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS E ADICIONAIS.

A perda de carga total resultante, calculada para cada método de estimativa e composição de rugosidade, é comparada então com o valor medido durante a operação normal da usina.

3.3.4 Perda de Carga Medida na Usina

O valor de perda de carga medido na própria usina foi determinado através de algumas variáveis obtidas durante um dia de operação das unidades geradoras. Este registro de operação das turbinas fornece a potência ativa na saída do gerador em MW, a vazão turbinada em m^3/s obtida pelo método de medição indireta Winter-Kennedy, a pressão na entrada da caixa espiral em bar, o nível medido na entrada da tomada d'água em metros, e o nível medido no canal de fuga junto a casa de máquinas em metros. Para utilizar estes dados de entrada tomou-se o cuidado de adotar períodos estáveis de operação, ou seja, sem variação de carga ou potência. Cabe ressaltar também que todas estas medições foram realizadas após

comissionamento da turbina pelo fabricante, ou seja, com todos os equipamentos devidamente calibrados.

Tendo em mãos estes valores, a perda de carga medida até a entrada da turbina é definida como sendo a diferença entre o nível de água no reservatório e o nível de energia calculado no ponto de tomada de pressão, na entrada da caixa espiral.

Este nível de energia é calculado com a medição de pressão, a elevação do piezômetro e a altura de velocidade cinética, calculada utilizando a vazão medida, a área da seção de entrada da caixa espiral e o fator de correção de energia cinética definido no item 2.5.

Finalmente, com as vazões e as perdas de carga determinadas é possível deduzir uma equação característica de perda de carga no circuito, no formato da equação [59].

$$h_{f_total} = K_{tot} \cdot Q^2 + K_{unit} \cdot \left(\frac{Q}{N_{un}} \right)^2 \quad [59]$$

Onde:

- h_{f_total} representa a perda de carga total no circuito de adução na turbina [mca];
- K_{tot} é o coeficiente de perda de carga do circuito a montante da bifurcação;
- K_{unit} é o coeficiente de perda de carga do circuito a jusante da bifurcação;
- Q é a vazão total fluindo no circuito de adução [m³/s];
- N_{un} é o número de unidades geradoras operando.

Todos os cálculos para a determinação dos coeficientes desta equação são apresentados no APÊNDICE C – PERDAS DE CARGA MEDIDAS DURANTE OPERAÇÃO.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos neste trabalho, sendo dividido nos seguintes itens:

- a) apresentação do resultado obtido da medição direta na usina;
- b) apresentação geral dos resultados de perdas de carga contínuas obtidos em cada frente;
- c) análise dos métodos de estimativa de rugosidade de rocha;
- d) análise dos métodos de composição de rugosidades;
- e) apresentação dos resultados de perda de carga total no circuito de adução; e
- f) análise comparativa das perdas de carga totais calculadas com as obtidas por medição local.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS DA MEDIÇÃO DA USINA

Com base nos cálculos apresentados no APÊNDICE C – PERDAS DE CARGA MEDIDAS DURANTE OPERAÇÃO foi possível determinar os coeficientes da equação de perda de carga para o circuito de geração de Chaglla, conforme a equação [5] apresentada no item 3.3.4. Estes coeficientes, determinados para um ajuste que minimizasse as diferenças entre os valores medidos, são:

- $K_{tot} = 0,001056141$
- $K_{unit} = 0,001268229$

Para a vazão nominal turbinada de 150,0m³/s e 2 unidades em funcionamento a plena carga, a perda de carga total medida na usina resulta no valor de:

- $h_{f_med} = 30,90 \text{ m}$

A partir deste resultado foi realizada uma avaliação preliminar do túnel, estimando uma rugosidade equivalente de rocha a partir dos dados nominais do mesmo.

O primeiro passo foi determinar as médias ponderadas de área e perímetros em função dos comprimentos de cada trecho, com base nas dimensões apresentadas na TABELA 3 e nos comprimentos e tipos de seções definidos na TABELA 6. Da perda de carga medida é descontado o valor de perda de carga

localizado, calculada no APÊNDICE B – PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS E ADICIONAIS, e assim determinam-se os parâmetros de entrada da TABELA 7.

TABELA 7 – PARÂMETROS PARA AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA RUGOSIDADE

h_f Total [m]	31,14
h_f Túnel [m]	24,00
COMPRIMENTO Túnel [m]	12832,50
ÁREA PONDERADA [m²]	53,27
PERÍMETRO TOTAL POND, [m]	26,73
PERÍMETRO ROCHA POND, [m]	20,01
PERÍMETRO PISO [m]	6,72
DIÂMETRO HIDRÁULICO [m]	7,97
RAIO HIDRÁULICO [m]	1,99
VELOCIDADE MÉDIA [m/s]	2,82
Nº <i>Reynolds</i>	2,24E+07

Calcula-se então uma rugosidade equivalente do túnel com piso revestido, realizando um cálculo reverso através das equações [5] e [10]. Desta rugosidade, da área e perímetros ponderados, da rugosidade do concreto e dos equacionamentos mostrados no item 2.3 é possível encontrar uma rugosidade equivalente de rocha média para o túnel:

- $\varepsilon_{eq_rocha} = 131 \text{ mm}$
- $n_{eq_rocha} = 0,0269$

Este coeficiente de rugosidade está dentro de uma faixa que equivale a um canal escavado em rocha com acabamento suave e uniforme, com coeficiente de Manning variando de 0,025 a 0,040 (CHOW, 1994). Já a altura de rugosidade encontra-se numa faixa para túneis em rocha escavada com uso de explosivos (*Drill & Blast*) com falhas moderadas (IDELCHIK, 2008), variando de 130 a 500mm.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM CADA FRENTE

Os resultados apresentados a seguir foram separados de acordo com as frentes de escavação definidas na TABELA 4. A opção de separar estes resultados tem como objetivo facilitar o entendimento das análises posteriores, sendo que o resultado total do cálculo, com todas as frentes contabilizadas, será apresentado no item 4.3.

Um resumo dos parâmetros principais dos trechos, obtidos durante as análises individuais, é apresentado na TABELA 8:

TABELA 8 – PARÂMETROS RESULTANTES DAS ANÁLISES

TRECHO	ÁREA [m ²]	PERÍM. [m]	RAIO HID. [m]	COMP. [m]	VEL. Q=150m ³ /s [m/s]	A _{media} / A _{nominal} [%]	DESVIO PADRÃO ÁREA [m ²]	COEF. VAR. ÁREA [%]
Frente 01 (a)	58,93	28,44	2,07	1 435,0	2,545	106,9%	2,76	4,69%
Frente 01 (b)	55,44	27,55	2,01	326,0	2,706	100,6%	5,46	9,86%
Frente 02 (a)	59,24	28,45	2,08	303,0	2,532	107,5%	1,37	2,32%
Frente 02 (b)	50,75	26,06	1,95	38,0	2,956	101,2%	0,40	0,80%
Frente 02 (c)	59,40	28,58	2,08	286,0	2,525	107,7%	1,74	2,94%
Frente 02 (d)	49,70	25,85	1,92	170,0	3,018	99,1%	0,94	1,89%
Frente 02 (e)	56,78	27,79	2,04	114,0	2,642	103,0%	4,08	7,18%
Frente 02 (f)	49,19	25,70	1,91	147,0	3,049	98,1%	0,63	1,28%
Frente 02 (g)	59,97	28,82	2,08	64,0	2,501	108,8%	1,69	2,81%
Frente 02 (h)	52,43	26,51	1,97	120,5	2,861	95,1%	5,81	11,08%
Frente 02 (i)	53,78	27,11	1,98	428,5	2,789	107,2%	5,13	9,54%
Frente 02 (j)	55,28	27,56	2,00	764,5	2,714	110,2%	2,54	4,59%
Frente 03 (a)	55,36	27,64	2,00	248,0	2,709	110,4%	2,34	4,23%
Frente 03 (b)	43,99	24,28	1,81	34,5	3,410	87,7%	0,48	1,09%
Frente 03 (c)	53,09	27,06	1,96	115,0	2,825	105,8%	2,36	4,44%
Frente 03 (d)	43,17	24,14	1,79	41,0	3,475	86,1%	1,21	2,81%
Frente 03 (e)	54,24	27,24	1,99	394,5	2,765	108,1%	2,36	4,35%
Frente 03 (f)	45,28	24,67	1,83	99,5	3,313	90,3%	3,85	8,50%
Frente 03 (g)	57,61	28,11	2,05	427,5	2,604	104,5%	3,37	5,85%
Frente 03 (h)	48,34	25,57	1,89	42,5	3,103	96,4%	0,49	1,02%
Frente 03 (i)	58,02	28,20	2,06	420,0	2,585	105,2%	2,24	3,85%
Frente 03 (j)	51,05	26,27	1,94	74,0	2,938	101,8%	4,35	8,53%
Frente 03 (k)	58,26	28,24	2,06	246,0	2,575	105,7%	2,31	3,97%
Frente 03 (l)	51,95	26,49	1,96	64,0	2,887	103,6%	4,28	8,25%
Frente 03 (m)	58,94	28,37	2,08	174,0	2,545	106,9%	1,55	2,63%
Frente 04 (a)	58,66	28,35	2,07	541,0	2,557	106,4%	1,80	3,07%
Frente 04 (b)	62,97	29,34	2,14	719,0	2,382	114,2%	3,46	5,49%
Frente 04 (c)	49,34	25,74	1,92	455,0	3,040	98,4%	1,72	3,48%
Frente 04 (d)	49,88	25,91	1,92	57,5	3,007	99,4%	5,14	10,31%
Frente 04 (e)	58,63	28,46	2,06	356,5	2,559	106,3%	2,06	3,51%
Frente 04 (f)	46,93	25,20	1,86	69,0	3,196	93,6%	3,19	6,79%
Frente 04 (g)	59,58	28,66	2,08	183,0	2,518	108,1%	2,84	4,76%
Frente 05 (a)	47,53	25,51	1,86	388,0	3,156	94,8%	4,91	10,34%
Frente 05 (b)	59,34	28,76	2,06	409,5	2,528	107,6%	2,13	3,59%
Frente 05 (c)	60,23	28,83	2,09	440,5	2,491	109,2%	3,81	6,32%
Frente 05 (d)	57,16	27,89	2,05	139,5	2,624	103,7%	3,62	6,32%
Frente 05 (e)	63,00	29,44	2,14	499,0	2,381	114,3%	3,35	5,31%
Frente 06 (a)	51,89	26,29	1,97	48,0	2,891	103,5%	2,67	5,14%
Frente 06 (b)	62,86	29,17	2,15	174,5	2,386	114,0%	1,94	3,09%
Frente 06 (c)	51,04	26,09	1,96	13,0	2,939	101,8%	0,46	0,90%
Frente 06 (d)	62,75	29,22	2,15	689,0	2,390	113,8%	1,80	2,87%
Frente 06 (e)	51,15	26,02	1,97	29,0	2,933	102,0%	0,54	1,06%
Frente 08 (a)	58,56	28,35	2,06	143,5	2,562	106,2%	4,00	6,83%
Frente 08 (b)	53,74	27,06	1,98	332,5	2,791	107,1%	3,25	6,06%
Frente 08 (c)	43,17	24,09	1,79	56,0	3,475	86,1%	0,67	1,56%
Frente 08 (d)	53,74	27,21	1,97	705,5	2,791	107,1%	1,80	3,35%
MÍNIMO	43,17	24,09	1,79	13,0	2,381	86,1%	0,40	0,80%
MÁXIMO	63,00	29,44	2,15	1435,0	3,475	114,3%	5,81	11,08%

O desvio padrão, relativo às áreas de cada trecho, serve para verificar a variação de seus valores ao longo da escavação. Já o coeficiente de variação expressa a relação percentual do desvio padrão em relação à média das medições, dando uma ideia de grandeza desta variação independente dos valores medidos.

Considerando que todos os métodos utilizam como parâmetro de entrada as áreas das seções, o coeficiente de variação de área serve como um indicador qualitativo da altura de rugosidade de cada trecho.

Os resultados apresentados nos itens a seguir foram obtidos aplicando as metodologias descritas no item 2.2 em todas as medições do túnel. Mais detalhes destes cálculos são apresentados no APÊNDICE A – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS NO TÚNEL.

4.2.1 Resultados da Frente 01

Na FIGURA 19 é apresentado um gráfico com as áreas e as divisões dos trechos da frente de escavação 01. Neste gráfico o eixo das ordenadas está em escala logarítmica para auxiliar na visualização das diferenças de áreas, permitindo assim identificar e definir as sub-frentes e as variações que levaram à respectiva divisão.

Outra forma de visualizar as características dos trechos escavados é plotar as médias das seções longitudinais num gráfico polar, usando como base o formato da seção arco-ferradura. Este gráfico é apresentado na FIGURA 20.

FIGURA 19 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 01

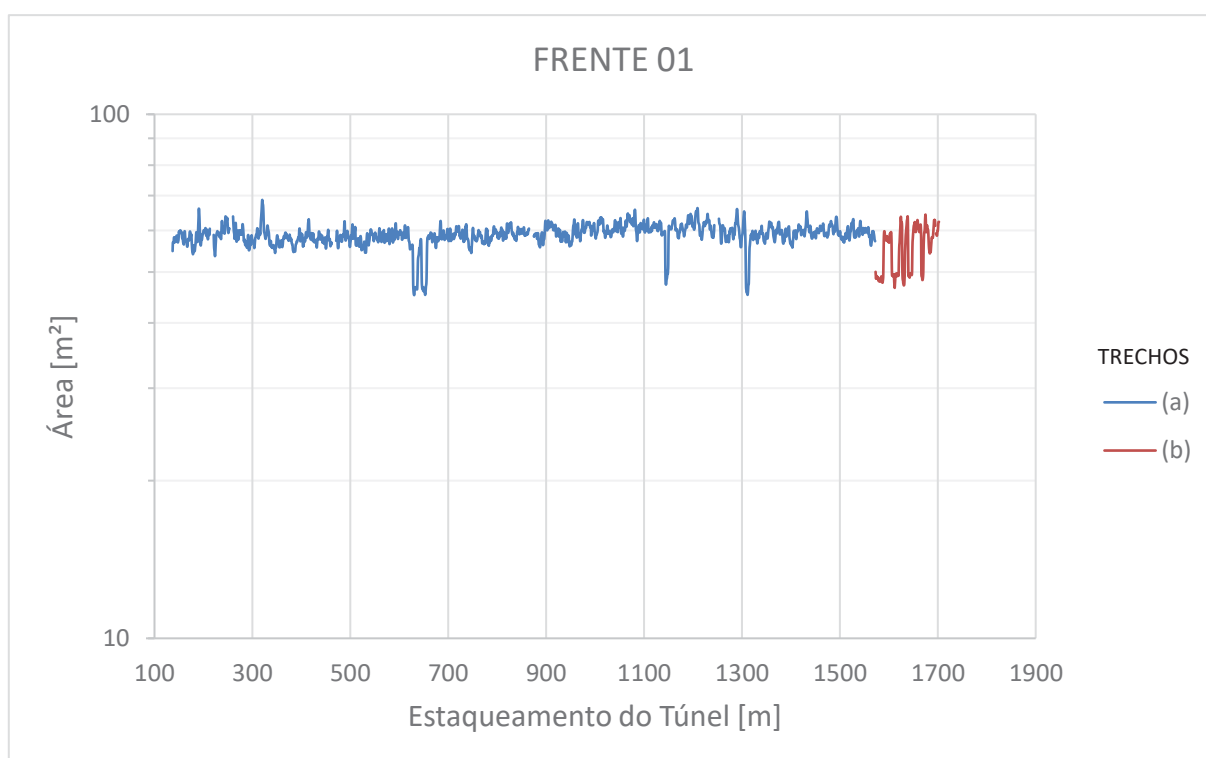
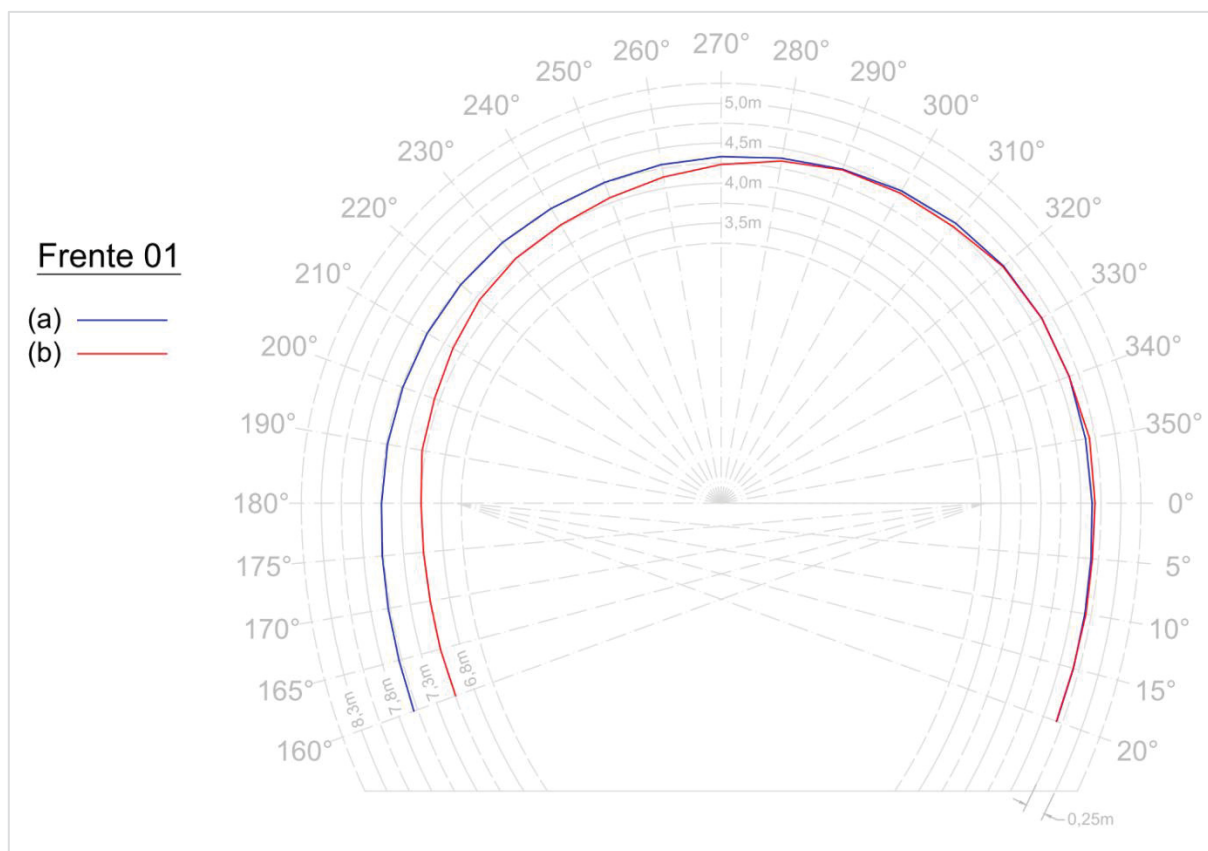


FIGURA 20 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 01



Tendo em mãos as medições de áreas e perímetros nas seções transversais, assim como as medidas das seções longitudinais ao longo do eixo principal, foi possível obter as rugosidades de rocha estimadas para a Frente 01.

As perdas de carga unitárias, com as rugosidades compostas conforme item 3.3.2 e incluindo os valores calculados pelo método de Wright, são calculadas. A partir destas perdas unitárias definem-se as perdas de carga contínuas em cada trecho, com base nos respectivos comprimentos.

As perdas de carga resultantes da transição entre trechos são calculadas conforme item 3.3.3 e adicionadas a esta perda de carga contínua.

Os resultados de perda de carga contínua da Frente 01 são apresentados na TABELA 9.

TABELA 9 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 01

h_f [m] – FRENTE 01		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	3,641	5,634	5,396	3,693	5,808	4,229	3,576	2,720	3,935
	"Pavlovskii":	3,958	6,334	6,046	4,018	6,543	4,651	3,881	2,888	3,935
	"Einstein":	3,812	6,019	5,753	3,869	6,213	4,458	3,740	2,809	3,935
	"Elfman":	3,936	6,282	5,998	3,996	6,488	4,621	3,859	2,877	3,935
Valor Médio:		3,836	6,068	5,798	3,894	6,263	4,490	3,764	2,824	3,935
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,145	0,320	0,297	0,149	0,335	0,193	0,139	0,077	-
Coeficiente de Variação:		3,79%	5,27%	5,12%	3,83%	5,36%	4,30%	3,71%	2,73%	-

4.2.2 Resultados da Frente 02

Na sequência são mostrados para a Frente 02 os gráficos de áreas com divisões de trechos, na FIGURA 21, e o gráfico polar com a média das seções longitudinais por trecho, na FIGURA 22.

FIGURA 21 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 02

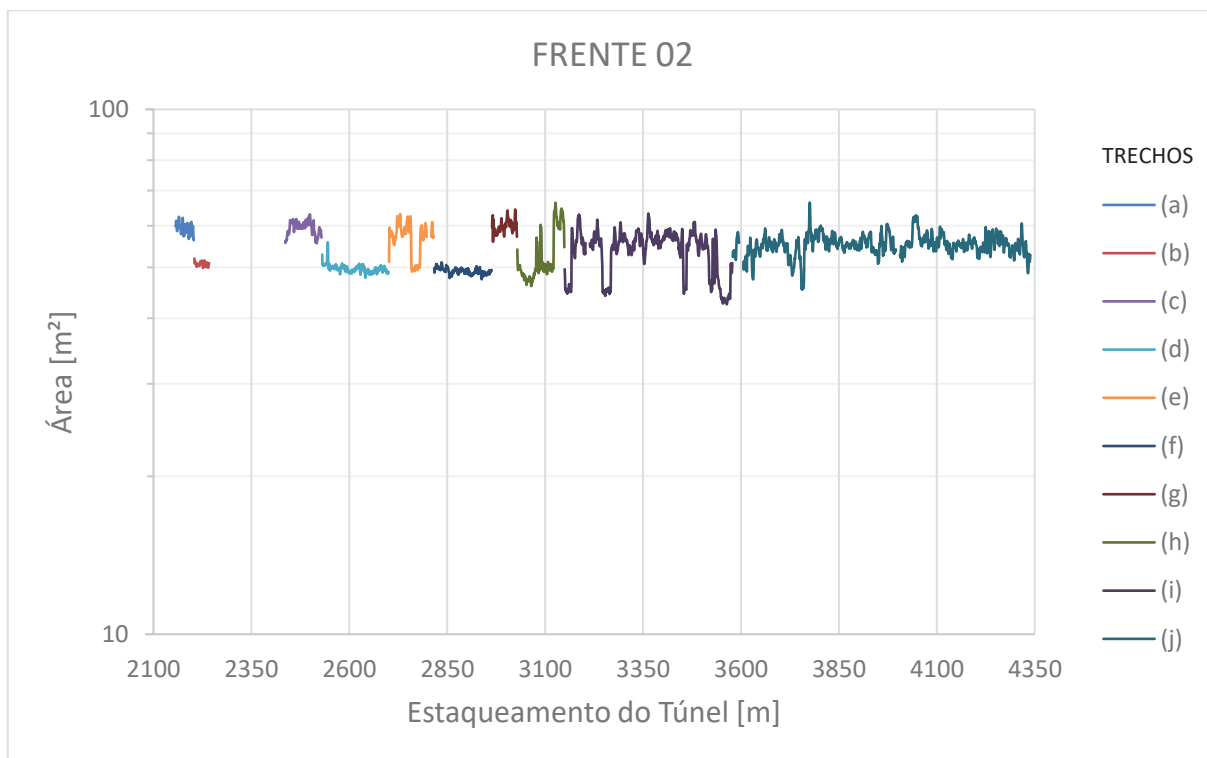
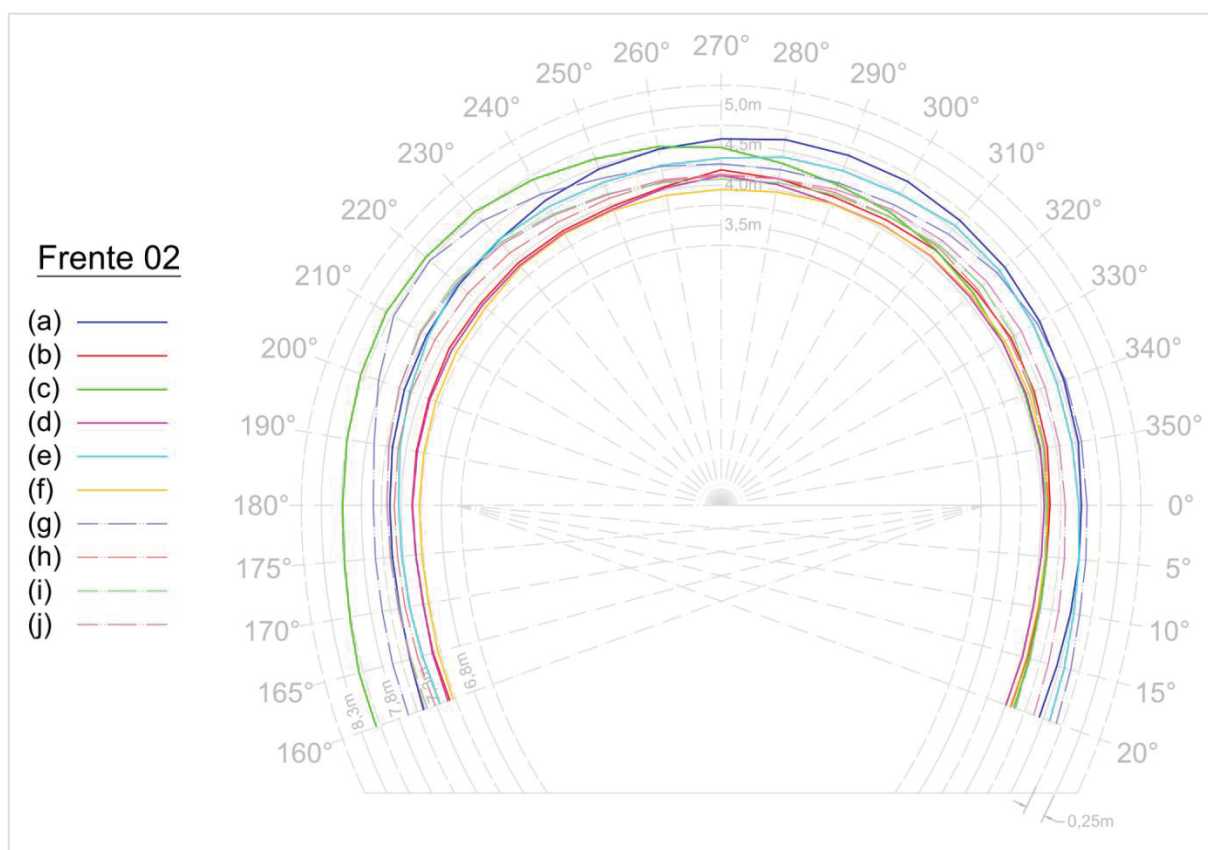


FIGURA 22 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 02



O trecho entre o estaqueamento 2+242 e 2+436 compreende a “Quebrada Lluto”, revestido em concreto moldado e blindagem, que atravessa uma falha geológica e não é contabilizada na perda contínua.

Os resultados das perdas de carga contínuas, descontando o trecho da “Quebrada Lluto” e incluindo as perdas das transições entre sub-frentes, são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 02

h _f [m] – FRENTE 02		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	5,530	6,500	6,179	4,676	6,645	5,388	5,870	4,466	5,317
	"Pavlovskii":	5,960	7,138	6,765	4,979	7,313	5,809	6,351	4,729	5,317
	"Einstein":	5,761	6,848	6,500	4,838	7,012	5,616	6,129	4,606	5,317
	"Elfman":	5,930	7,092	6,722	4,958	7,264	5,779	6,317	4,712	5,317
Valor Médio:		5,795	6,894	6,542	4,863	7,058	5,648	6,167	4,628	5,317
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,197	0,292	0,268	0,139	0,305	0,193	0,221	0,121	-
Coeficiente de Variação:		3,40%	4,24%	4,10%	2,86%	4,33%	3,42%	3,58%	2,61%	-

4.2.3 Resultados da Frente 03

Para a Frente 03 os mesmos gráficos são plotados para demonstrar a separação dos trechos. Na FIGURA 23 estão as variações de áreas, enquanto na FIGURA 24 são plotadas as médias das seções longitudinais.

FIGURA 23 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 03

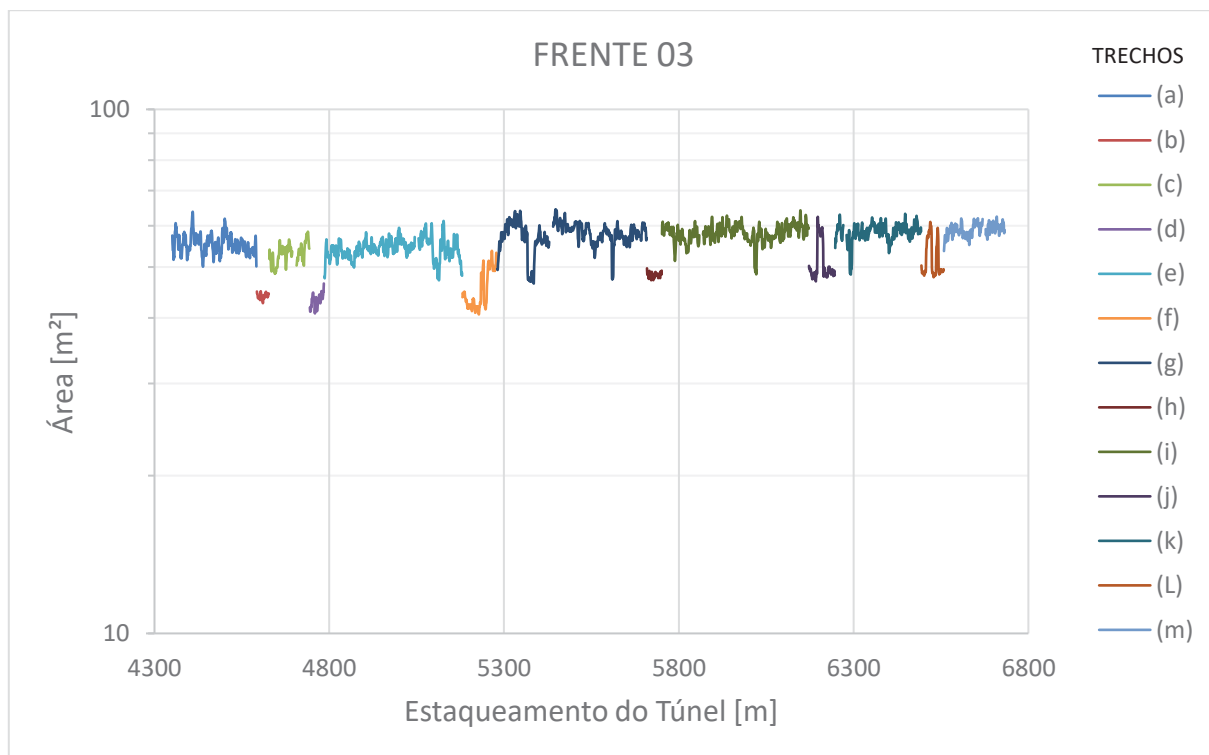
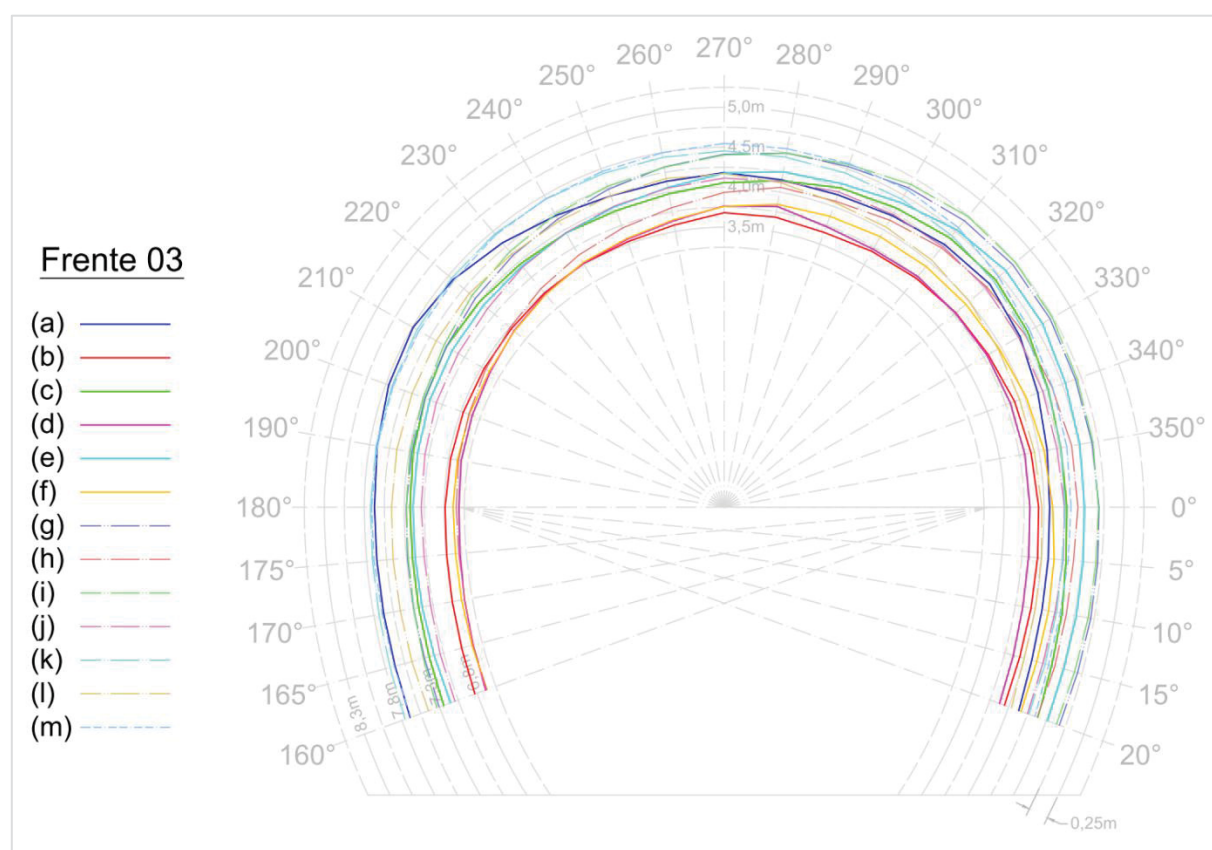


FIGURA 24 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 03



Esta separação dos trechos curtos, cujas áreas médias são menores, (b), (d), (f), (h), (j) e (L), são aqueles que foram sujeitos a um tratamento mais intenso resultando numa diminuição de área, ou foram escavados com a seção original de projeto.

Os resultados das perdas de carga contínuas da Frente 03 são resumidos na TABELA 11.

TABELA 11 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 03

h_f [m] – FRENTE 03		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	<i>Ponderada:</i>	5,371	6,909	6,083	4,836	6,543	5,332	5,817	4,476	5,459
	<i>"Pavlovskii":</i>	5,768	7,579	6,619	5,156	7,160	5,729	6,283	4,736	5,459
	<i>"Einstein":</i>	5,584	7,274	6,373	5,007	6,879	5,545	6,068	4,614	5,459
	<i>"Elfman":</i>	5,741	7,531	6,581	5,135	7,116	5,702	6,251	4,719	5,459
Valor Médio:		5,616	7,323	6,414	5,034	6,925	5,577	6,105	4,636	5,459
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,183	0,307	0,246	0,147	0,283	0,183	0,214	0,120	-
Coeficiente de Variação:		3,25%	4,19%	3,83%	2,92%	4,08%	3,27%	3,51%	2,58%	-

4.2.4 Resultados da Frente 04

Da mesma maneira que as outras frentes, para a Frente 04 são plotados os gráficos para demonstrar a separação dos trechos. Na FIGURA 25 estão as variações de áreas, enquanto na FIGURA 26 são plotadas as médias das seções longitudinais.

FIGURA 25 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 04

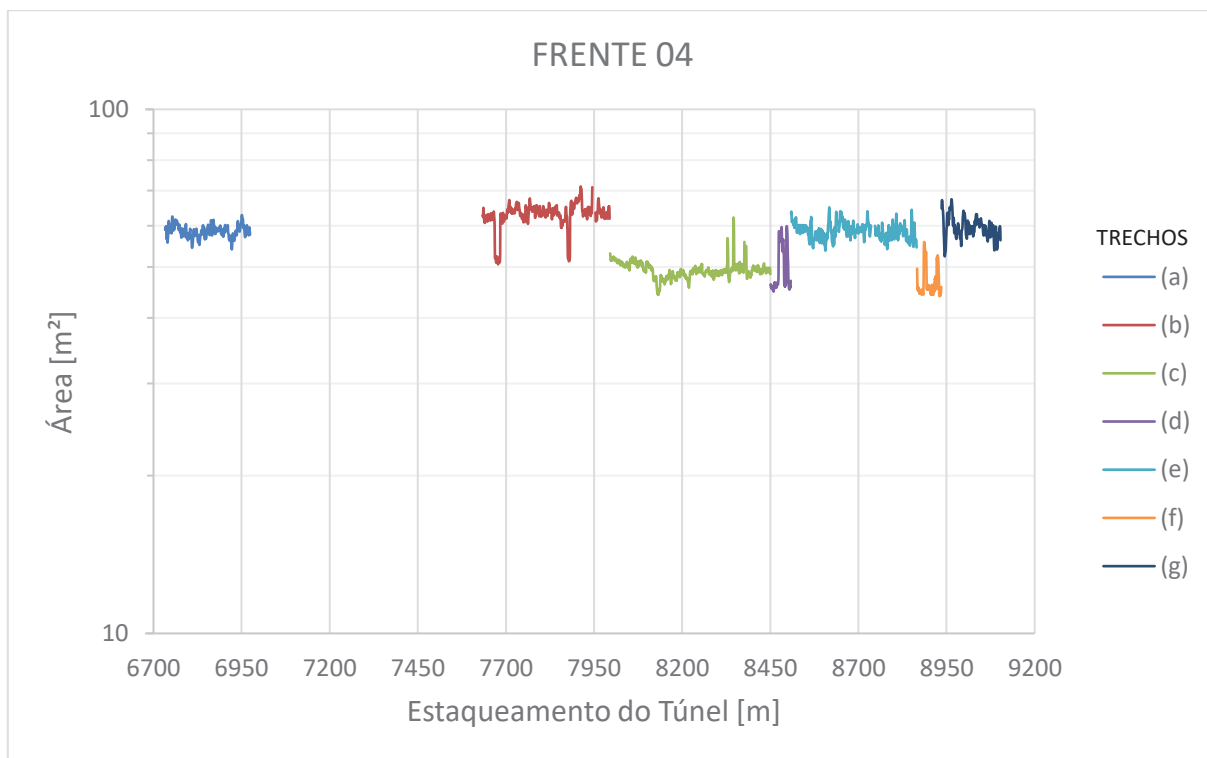
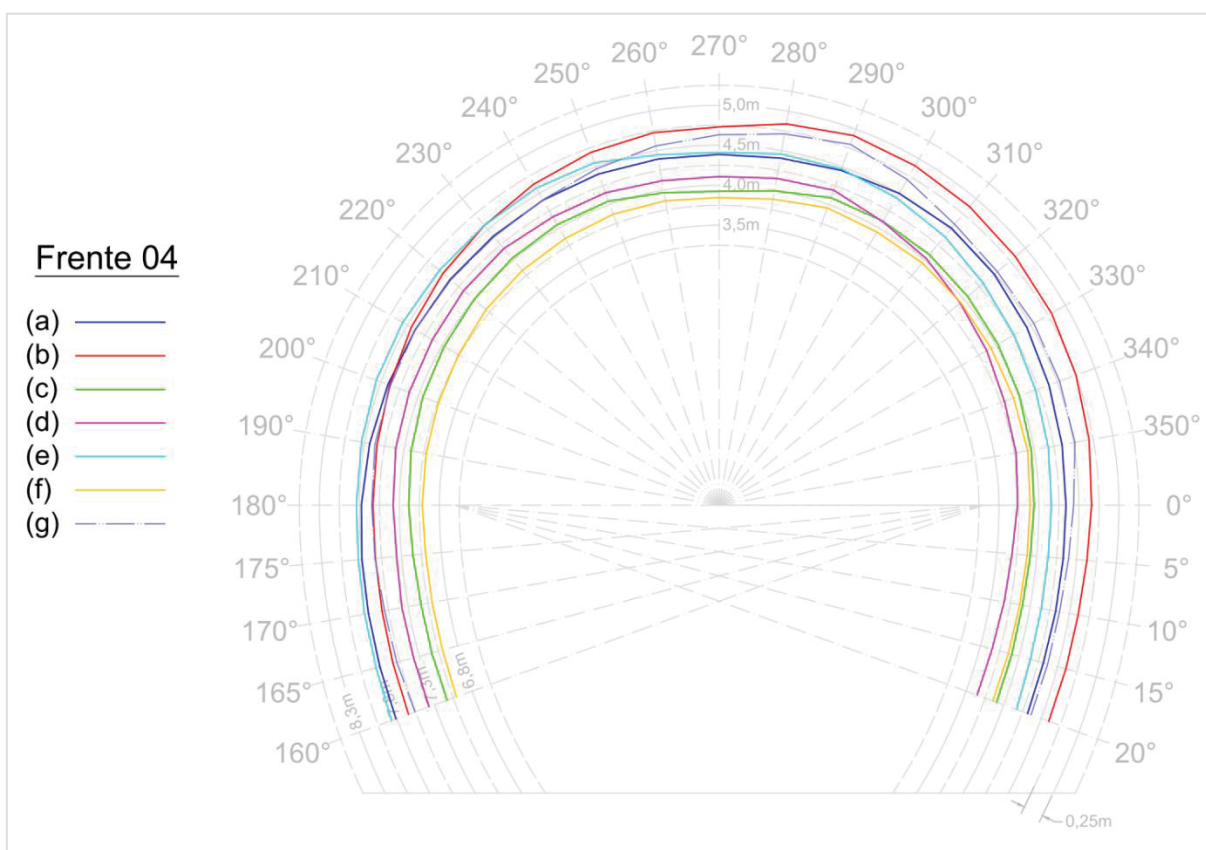


FIGURA 26 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 04



O trecho compreendido entre os estaqueamentos 7+131 e 7+633 não foi escaneado durante a campanha de medição com laser. Considerando que o túnel ainda estava em processo construtivo, provavelmente este trecho estava inacabado ou em tratamento superficial. Ainda assim por se tratar de um trecho relativamente curto (~500 m) o mesmo foi incluído no cálculo, ao adicionar seu comprimento nos trechos 04(a) e 04(b) no cálculo de perdas de carga contínuas.

Os resultados das perdas de carga contínuas da Frente 04, que incluem o trecho vazio descrito acima e as perdas localizadas das transições entre sub-frentes, são apresentados na TABELA 12.

TABELA 12 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 04

h_f [m] – FRENTE 04		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	4,849	5,999	5,404	4,232	5,835	4,754	5,178	4,001	4,850
	"Pavlovskii":	5,211	6,559	5,871	4,504	6,375	5,106	5,595	4,234	4,850
	"Einstein":	5,044	6,304	5,658	4,378	6,129	4,943	5,403	4,125	4,850
	"Elfman":	5,187	6,520	5,838	4,486	6,337	5,082	5,566	4,219	4,850
Valor Médio:		5,073	6,345	5,693	4,400	6,169	4,971	5,435	4,145	4,850
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,166	0,257	0,214	0,125	0,248	0,162	0,191	0,107	-
Coeficiente de Variação:		3,28%	4,04%	3,76%	2,84%	4,02%	3,25%	3,52%	2,59%	-

4.2.5 Resultados da Frente 05

Os resultados da Frente 05 são apresentados de maneira análoga ao que foi apresentado até o momento. Na FIGURA 27 são mostradas as variações de áreas e subdivisões da Frente, enquanto na FIGURA 28 são plotadas as médias das medições longitudinais.

FIGURA 27 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 05

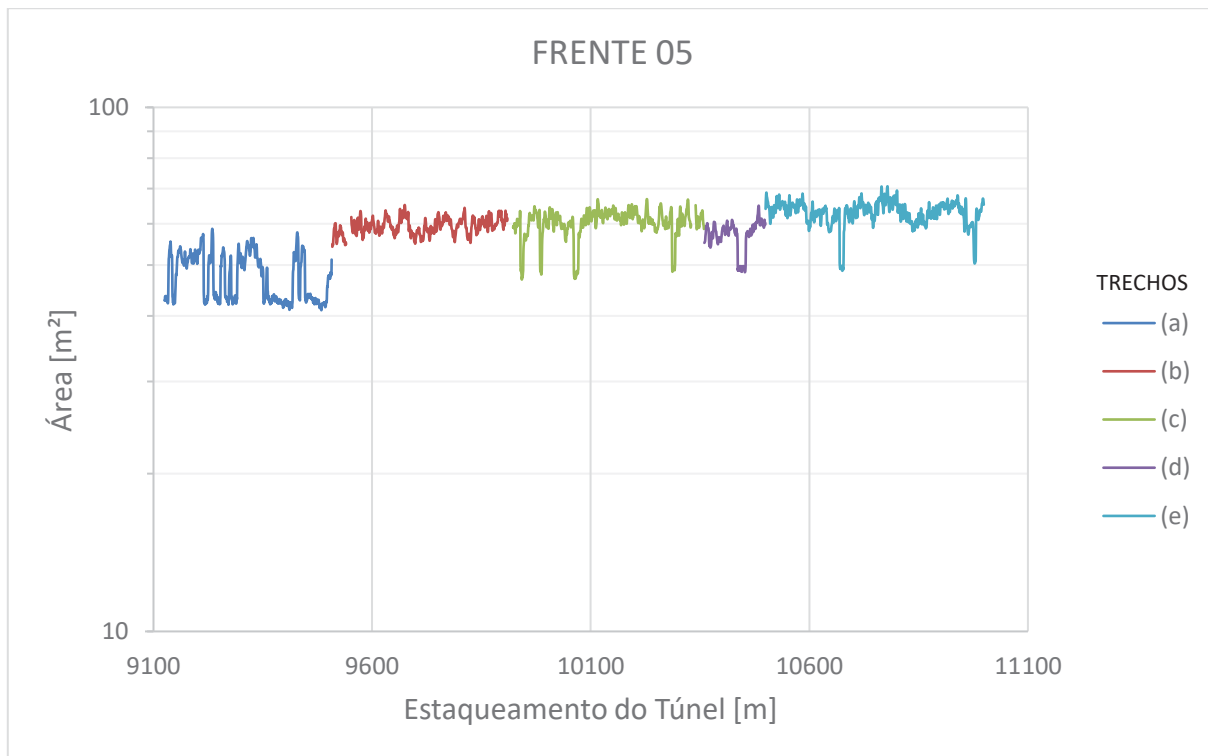
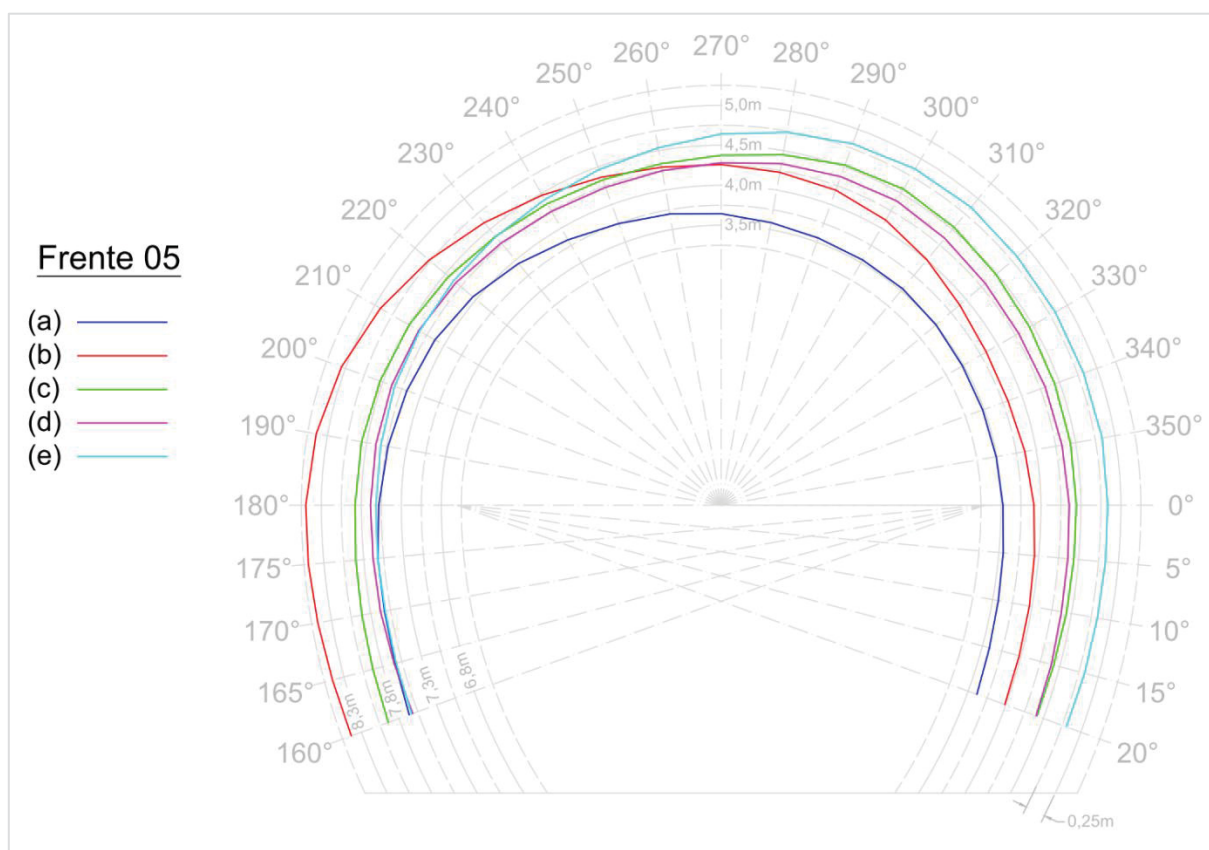


FIGURA 28 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 05



Cabe destacar que o trecho compreendido entre as estacas 9+500 e 11+000, apesar de ter a seção revisada como referência, foi subdividido em função do tipo de rocha e do tipo de tratamento aplicado. Isto fica nítido na FIGURA 27, onde o trecho (b) apresenta uma menor variação de área, os trechos (c) e (e) apresentam uma característica similar entre si porém com maior variação em relação ao trecho (b), e o trecho (d) apresenta uma variação de área similar aos outros, porém possui uma área média inferior aos outros trechos.

Os resultados das perdas contínuas da Frente 05 são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 05

h _f [m] – FRENTE 05		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	4,417	5,523	5,494	3,719	5,906	4,451	4,385	3,157	4,123
	"Pavlovskii":	4,819	6,136	6,109	4,005	6,603	4,863	4,781	3,352	4,123
	"Einstein":	4,634	5,858	5,831	3,872	6,289	4,674	4,599	3,260	4,123
	"Elfman":	4,791	6,091	6,064	3,985	6,551	4,833	4,753	3,338	4,123
Valor Médio:		4,665	5,902	5,875	3,895	6,337	4,705	4,629	3,277	4,123
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,184	0,281	0,281	0,131	0,318	0,189	0,182	0,089	-
Coeficiente de Variação:		3,95%	4,76%	4,79%	3,36%	5,02%	4,01%	3,92%	2,73%	-

4.2.6 Resultados da Frente 06

Na sequência são apresentados os resultados da Frente 06. O gráfico com a variação de área e divisão de trechos está na FIGURA 29, enquanto as médias das seções longitudinais estão plotadas na FIGURA 30.

FIGURA 29 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 06

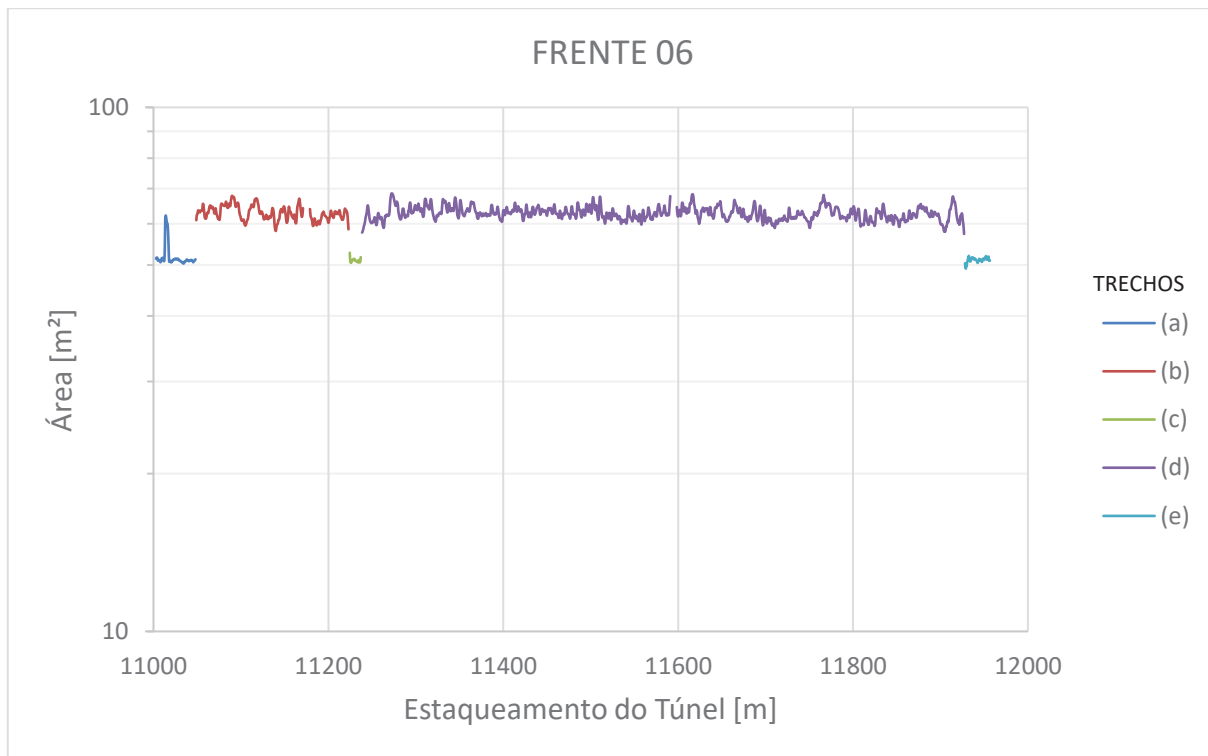
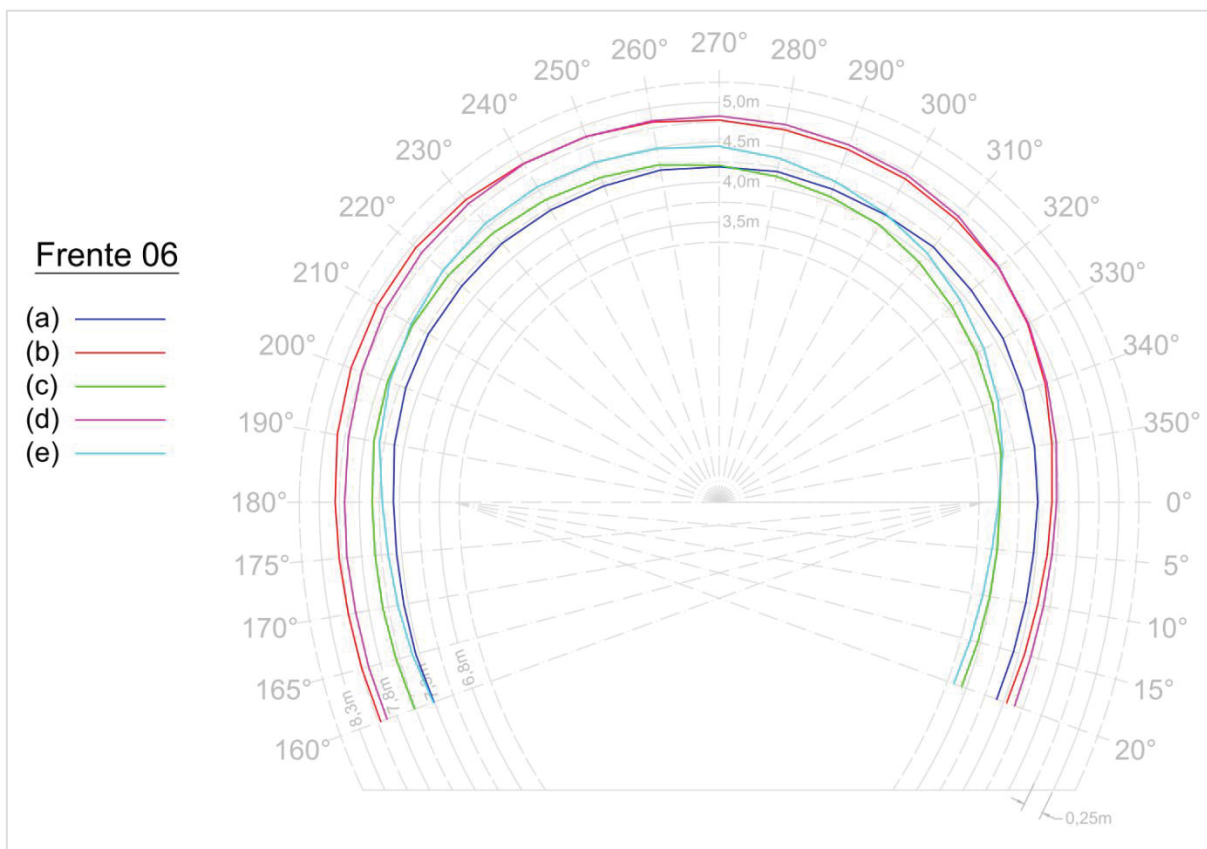


FIGURA 30 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 06



Os trechos (a), (c) e (e), apesar de curtos, foram destacados em sub-frentes por apresentarem características de trechos com tratamento mais extensivo, o que usualmente reduz a área média, porém melhora a rugosidade superficial.

Os resultados de perda contínuas na Frente 06, com os diferentes métodos de estimativa de rugosidade de rocha e composição de rugosidades, são apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 06

h _f [m] – FRENTE 06		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	1,650	1,710	1,182	1,181	1,283	1,240	1,930	1,343	1,520
	"Pavlovskii":	1,768	1,837	1,236	1,234	1,350	1,300	2,092	1,416	1,520
	"Einstein":	1,714	1,778	1,210	1,209	1,318	1,272	2,018	1,382	1,520
	"Elfman":	1,760	1,828	1,233	1,231	1,345	1,296	2,081	1,411	1,520
Valor Médio:		1,723	1,788	1,215	1,214	1,324	1,277	2,030	1,388	1,520
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,054	0,059	0,025	0,024	0,031	0,028	0,074	0,034	-
Coeficiente de Variação:		3,15%	3,27%	2,06%	2,00%	2,33%	2,17%	3,66%	2,41%	-

4.2.7 Resultados da Frente 08

Finalmente, seguem abaixo os gráficos de variação de área e separação em trechos, na FIGURA 31, e de médias das medições longitudinais na FIGURA 32.

FIGURA 31 – VARIAÇÃO DE ÁREAS DE CADA TRECHO DA FRENTE 08

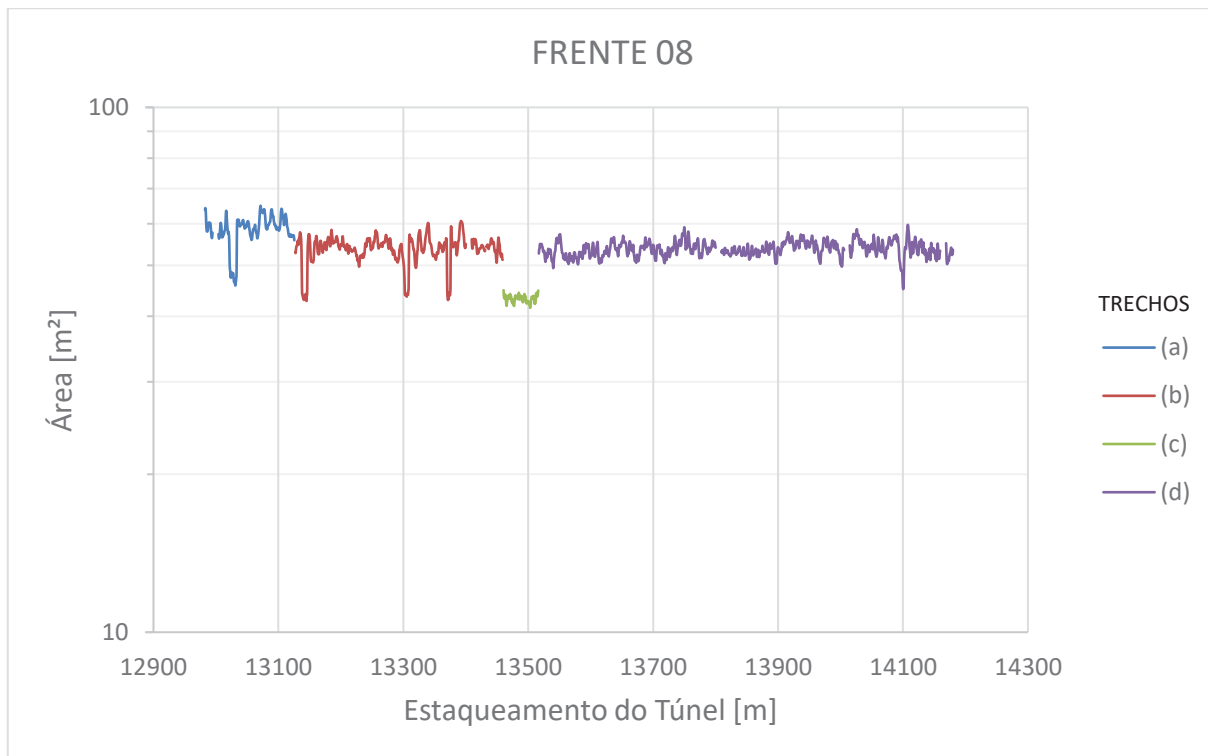
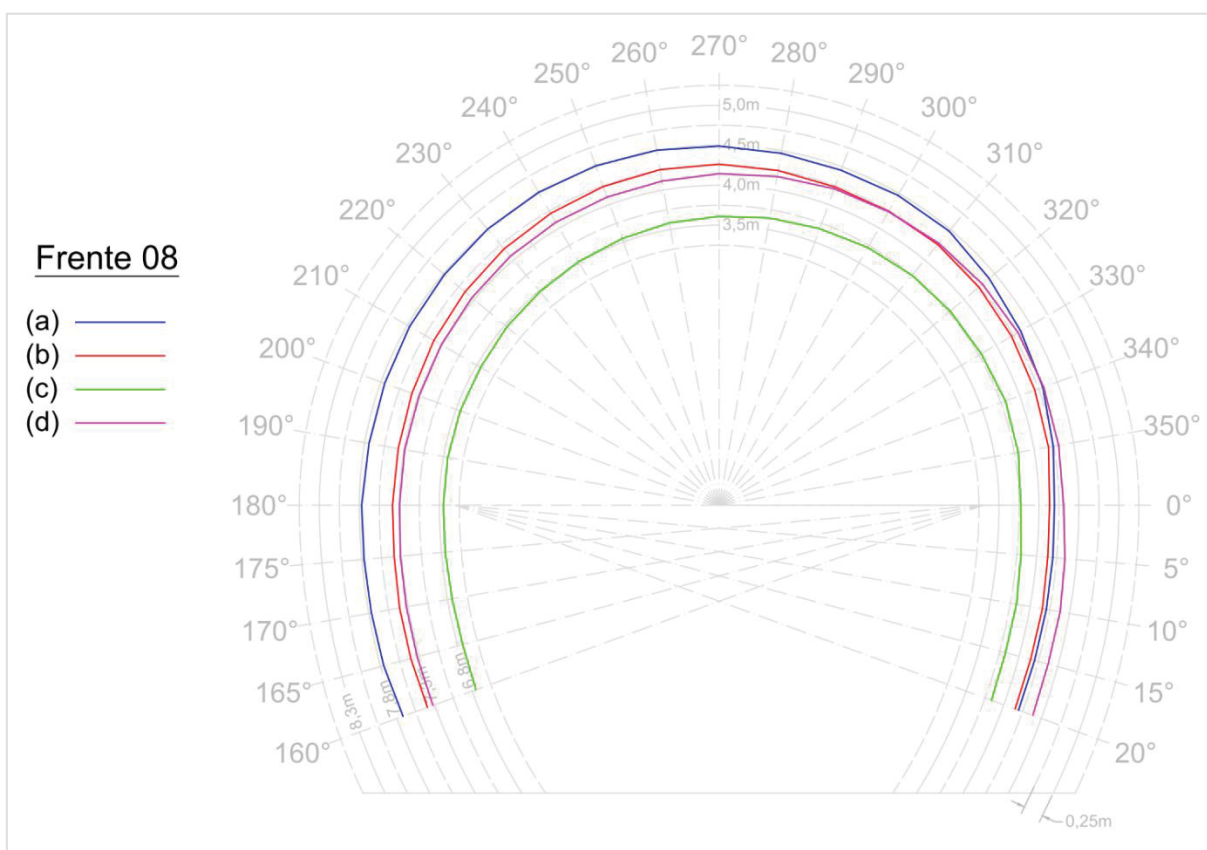


FIGURA 32 – GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS SEÇÕES LONGITUDINAIS DE CADA TRECHO DA FRENTE 08



No gráfico de divisão de trechos, na FIGURA 31, fica nítido a divisão da seção de escavação revisada (trecho (a)) com a seção original de projeto (trechos (b), (c) e (d)). Além desta divisão, também é possível ver como diferem as áreas entre os trechos com seção original ((b), (c) e (d)), o que indica uma variação no tipo de tratamento superficial de rocha adotado.

Os resultados de perda de carga contínuas para a Frente 08 são detalhados na TABELA 15.

TABELA 15 – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DA FRENTE 08

h _f [m] – FRENTE 08		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
	Ponderada:	3,116	4,319	3,134	2,578	3,366	2,795	3,210	2,449	3,026
	"Pavlovskii":	3,370	4,792	3,409	2,749	3,680	3,003	3,476	2,597	3,026
	"Einstein":	3,253	4,577	3,284	2,669	3,537	2,907	3,353	2,528	3,026
	"Elfman":	3,352	4,757	3,390	2,738	3,658	2,988	3,458	2,587	3,026
Valor Médio:		3,273	4,611	3,304	2,684	3,560	2,923	3,374	2,540	3,026
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		0,117	0,216	0,126	0,079	0,144	0,095	0,122	0,068	-
Coeficiente de Variação:		3,56%	4,69%	3,81%	2,94%	4,05%	3,26%	3,62%	2,67%	-

4.3 PERDA DE CARGA TOTAL CALCULADA

4.3.1 Perdas Localizadas e Adicionais

As perdas localizadas no circuito de adução compreendem desde grade e ranhuras na tomada d'água até transições de seções, curvas, bifurcações e etc. As perdas adicionais que foram incluídas neste capítulo compreendem todas as perdas contínuas que não se enquadram no túnel escavado, ou seja, perdas em trechos de concreto moldado, blindagens e condutos em aço.

Estas perdas foram calculadas considerando a vazão máxima turbinada passando no circuito de adução, ou seja, 150 m³/s para os trechos comuns e 75 m³/s para os trechos unitários. As rugosidades de concreto e aço são aquelas apresentadas na TABELA 1. As dimensões são definidas com base nos desenhos do projeto concluído, sem levar em conta possíveis variações construtivas.

Os resultados para cada tipo de perda são:

- $h_{f_{loc}} = 2,39 \text{ m}$
- $h_{f_{ad}} = 4,97 \text{ m}$

Que resulta numa perda adicional, além da perda contínua no túnel, de:

- $h_{f_{loc+ad}} = 7,36 \text{ m}$

É interessante notar que as perdas localizadas $h_{f_{loc}}$ resultam num valor próximo a 7,8% da perda total medida na usina e descrita no item 4.1. Isto se deve principalmente pelo circuito de adução ser bastante longo e as velocidades adotadas nos trechos de blindagem/conduto serem consideravelmente altas, resultando numa parcela maior de perda de carga contínua, que representa os restantes 92,2% da perda total medida na usina.

Este resultado indica que a variação de perdas localizadas pela utilização de métodos de cálculos distintos daqueles apresentados no item 2.4 possui um impacto mínimo no valor da perda de carga total calculada. Desta maneira, estas possíveis variações de perdas de carga localizadas e seu respectivo estudo não fazem parte do escopo deste trabalho.

4.3.2 Perdas Contínuas no Túnel

As perdas contínuas ao longo do túnel foram calculadas conforme os métodos detalhados nos itens 2.2 e 2.3. Os valores médios de rugosidade de rocha obtidos em todas as frentes, ponderados em função do comprimento de cada trecho, estão resumidos na TABELA 16.

TABELA 16 – RUGOSIDADES DE ROCHA RESULTANTES NAS FRENTES E MÉDIA TOTAL, SEPARADAS POR MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE

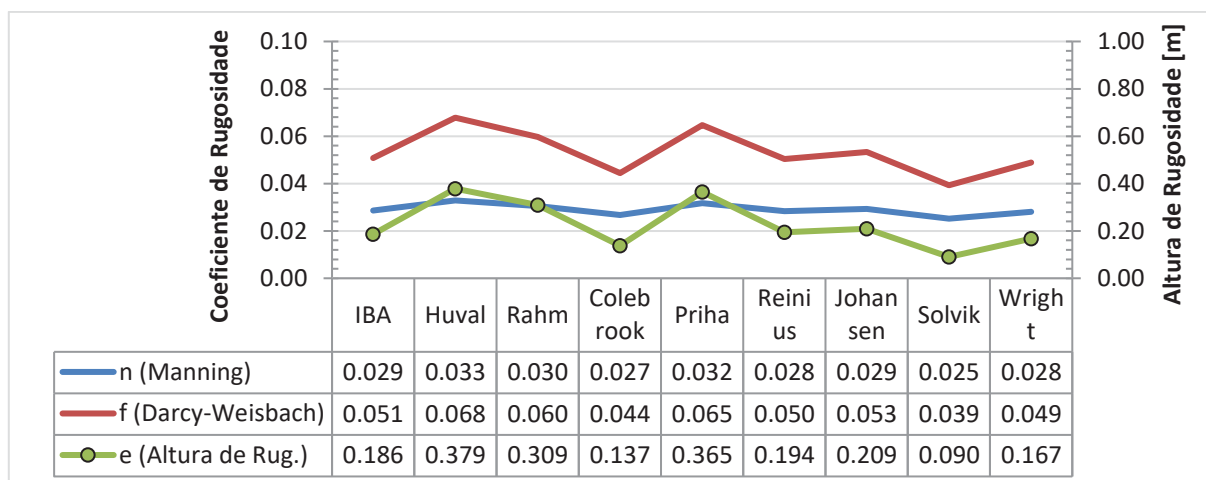
		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
FRETE 01	ε (m) =	0,3779	1,0075	0,9209	0,4002	1,0597	0,5495	0,3631	0,1698
	f =	0,0686	0,1140	0,1084	0,0706	0,1176	0,0823	0,0677	0,0493
	n =	0,0333	0,0430	0,0419	0,0338	0,0437	0,0365	0,0331	0,0283
FRETE 02	ε (m) =	0,3267	0,5737	0,5192	0,2166	0,6007	0,3351	0,3700	0,1679
	f =	0,0644	0,0833	0,0752	0,0533	0,0816	0,0632	0,0688	0,0496
	n =	0,0320	0,0361	0,0334	0,0290	0,0349	0,0314	0,0332	0,0282
FRETE 03	ε (m) =	0,2911	0,5903	0,4452	0,2352	0,5275	0,3019	0,3443	0,1672
	f =	0,0618	0,0853	0,0729	0,0557	0,0795	0,0620	0,0668	0,0495
	n =	0,0315	0,0369	0,0338	0,0298	0,0353	0,0314	0,0327	0,0282
FRETE 04	ε (m) =	0,3073	0,5519	0,4535	0,2245	0,5388	0,3081	0,3749	0,1668
	f =	0,0626	0,0814	0,0719	0,0540	0,0786	0,0614	0,0681	0,0491
	n =	0,0318	0,0361	0,0336	0,0294	0,0352	0,0313	0,0332	0,0282
FRETE 05	ε (m) =	0,4304	0,7763	0,7351	0,3075	0,8507	0,4527	0,4305	0,1712
	f =	0,0732	0,0978	0,0940	0,0620	0,1022	0,0741	0,0733	0,0496
	n =	0,0344	0,0396	0,0385	0,0315	0,0402	0,0344	0,0344	0,0283
FRETE 06	ε (m) =	0,3220	0,3595	0,1145	0,1142	0,1503	0,1302	0,4800	0,1664
	f =	0,0628	0,0658	0,0414	0,0418	0,0458	0,0439	0,0755	0,0483
	n =	0,0320	0,0328	0,0259	0,0262	0,0273	0,0268	0,0351	0,0281
FRETE 08	ε (m) =	0,3529	0,7609	0,4327	0,2272	0,5040	0,2930	0,3563	0,1706
	f =	0,0677	0,0990	0,0699	0,0545	0,0759	0,0602	0,0683	0,0502
	n =	0,0329	0,0397	0,0326	0,0293	0,0340	0,0307	0,0330	0,0283
MÉDIA TOTAL	ε (m) =	0,3409	0,6641	0,5416	0,2534	0,6324	0,3513	0,3809	0,1685
	f =	0,0656	0,0899	0,0785	0,0568	0,0854	0,0651	0,0693	0,0494
	n =	0,0325	0,0378	0,0348	0,0301	0,0363	0,0321	0,0334	0,0282

As médias dos coeficientes e das alturas de rugosidade compostas, obtidos ao longo de todo o túnel, são apresentadas na TABELA 17 e na FIGURA 33. Estes valores de rugosidade foram calculados trecho a trecho, onde a média total foi obtida com base nas relações entre comprimentos de cada trecho e comprimento total.

TABELA 17 – TABELA COM O RESUMO DOS COEFICIENTES DE MANNING COMPOSTOS E DAS ALTURAS DE RUGOSIDADE COMPOSTAS DE TODAS AS FRENTES

		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
n (Manning) [m ^{-1/3} .s]	Ponderada	0,028	0,032	0,030	0,026	0,031	0,028	0,029	0,025	0,028
	"Pavlovskii"	0,029	0,033	0,031	0,027	0,032	0,029	0,030	0,025	0,028
	"Einstein"	0,028	0,033	0,030	0,027	0,032	0,028	0,029	0,025	0,028
	"Elfman"	0,029	0,033	0,031	0,027	0,032	0,029	0,030	0,025	0,028
	Varição máxima:	<u>0,001</u>	<u>0,002</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,002</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	<u>0,001</u>	-
	MÉDIA TOTAL:	0,029	0,033	0,030	0,027	0,032	0,028	0,029	0,025	0,028
ε (Alt. De Rug.) [m]	Ponderada	0,164	0,328	0,268	0,122	0,316	0,170	0,183	0,081	0,167
	"Pavlovskii"	0,201	0,410	0,335	0,147	0,395	0,209	0,225	0,096	0,167
	"Einstein"	0,183	0,372	0,304	0,135	0,359	0,191	0,206	0,089	0,167
	"Elfman"	0,198	0,404	0,330	0,146	0,389	0,206	0,222	0,095	0,167
	Varição máxima:	<u>0,037</u>	<u>0,082</u>	<u>0,066</u>	<u>0,026</u>	<u>0,079</u>	<u>0,039</u>	<u>0,042</u>	<u>0,015</u>	-
	MÉDIA TOTAL:	0,186	0,379	0,309	0,137	0,365	0,194	0,209	0,090	0,167

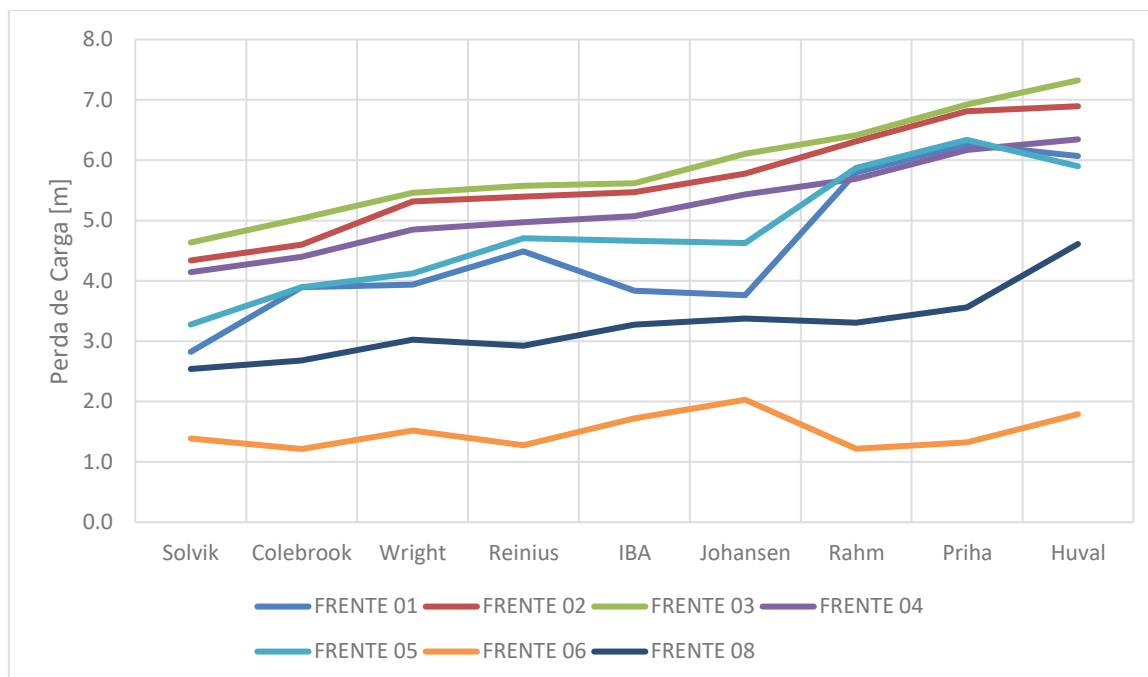
FIGURA 33 – RESUMO DE ALTURA E COEFICIENTES DE RUGOSIDADES COMPOSTAS SEPARADOS POR MÉTODO DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA



Em resumo, no túnel de adução o coeficiente composto de Manning variou em suas médias totais de $0,025\text{m}^{-1/3}.\text{s}$ até $0,033\text{m}^{-1/3}.\text{s}$, enquanto a altura de rugosidade variou de 90mm até 379mm. Cabe ainda indicar que o valor do Coeficiente de Manning para o concreto do piso, calculado com base no valor de 1,00mm de altura de rugosidade (ver TABELA 1), resultou em média em $0,0142\text{ m}^{-1/3}.\text{s}$ em todas as frentes.

Após determinar os valores de perdas de carga de cada frente de escavação, os mesmos são somados e separados de acordo com o método aplicado. Um resumo com o valor médio dessas perdas, separado por frente e por método de estimativa de rugosidade, é apresentado graficamente na FIGURA 34.

FIGURA 34 – RESUMO DE PERDAS CONTÍNUAS EM CADA FRENTE DE ESCAVAÇÃO



Neste gráfico os métodos foram ordenados de forma tal que a soma dos valores resultasse crescente. É interessante notar como alguns métodos mantêm uma tendência de crescimento comum entre si, independente do trecho escavado. Já outros métodos apresentam variações neste ordenamento ao longo das frentes, como é possível ver para *Huval* (1969) e *Johansen* (1966).

Os valores somados, que representam a perda contínua ao longo do túnel de adução, são resumidos na TABELA 18.

TABELA 18 – RESUMO DAS PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS DO TÚNEL DE ADUÇÃO

h _f [m] – RESUMO		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA	Ponderada:	28,263	36,593	32,651	24,660	35,146	27,945	29,597	22,334	28,230
	"Pavlovskii":	30,522	40,375	35,824	26,377	38,772	30,204	32,059	23,656	28,230
	"Einstein":	29,479	38,658	34,383	25,580	37,131	29,164	30,925	23,036	28,230
	"Elfman":	30,365	40,102	35,595	26,260	38,507	30,046	31,888	23,568	28,230
Valor Médio:		29,657	38,932	34,613	25,719	37,389	29,340	31,117	23,149	28,230
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		1,039	1,731	1,453	0,789	1,660	1,037	1,130	0,608	-
Coeficiente de Variação:		3,50%	4,45%	4,20%	3,07%	4,44%	3,53%	3,63%	2,63%	-

Os valores médios de perda de carga variaram de 23,15m até 38,93m, com um coeficiente de variação entre os métodos de ponderação que chegou a 4,45%.

4.3.3 Perdas de Carga Totais Calculadas no Circuito de Geração

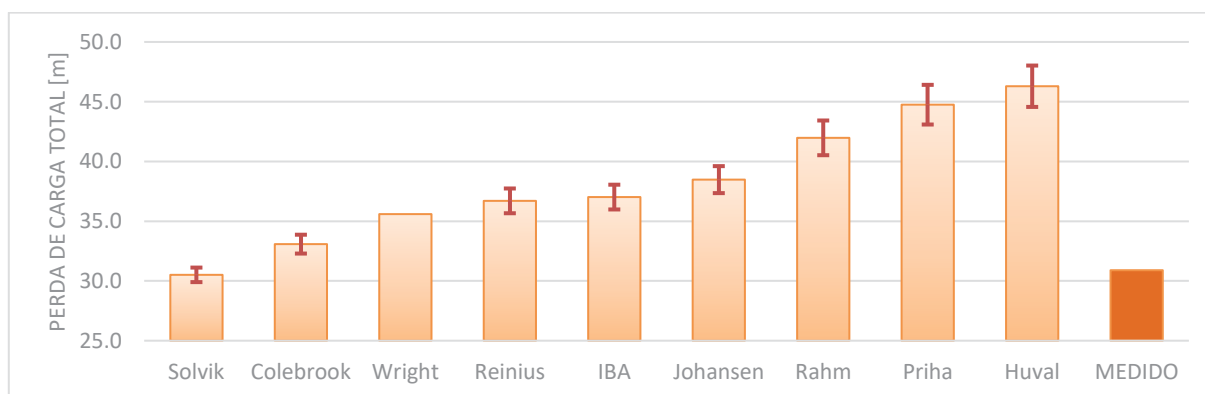
Os valores de perda de carga totais, calculados no circuito de geração, são definidos como o somatório das perdas contínuas definidas no item 4.3.2 e as perdas localizadas e adicionais definidas no item 4.3.1. A TABELA 19 apresenta um resumo destes valores, em conjunto com o valor médio obtido em cada método de escavação e os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

TABELA 19 – PERDAS DE CARGA TOTAIS CALCULADAS NO CIRCUITO DE GERAÇÃO

h_{f_total} [m]		MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE DO TÚNEL EM ROCHA								
		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik	Wright
MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUGOSIDADE COMPOSTA	<i>Ponderada:</i>	35,625	43,955	40,013	32,023	42,508	35,307	36,959	29,696	35,593
	<i>"Pavlovskii":</i>	37,884	47,737	43,186	33,739	46,134	37,566	39,421	31,018	35,593
	<i>"Einstein":</i>	36,841	46,021	41,745	32,942	44,493	36,526	38,287	30,399	35,593
	<i>"Elfman":</i>	37,728	47,464	42,957	33,622	45,869	37,408	39,250	30,930	35,593
Valor Médio:		37,019	46,294	41,975	33,081	44,751	36,702	38,479	30,511	35,593
Desvio Padrão $\sigma(h_f)$:		1,037	1,731	1,453	0,788	1,659	1,037	1,130	0,608	-
Coeficiente de Variação:		2,80%	3,74%	3,46%	2,38%	3,71%	2,82%	2,94%	1,99%	-

Nota-se que os valores médios flutuaram entre 30,51m e 46,29m, com um coeficiente de variação entre métodos de composição de rugosidade variando de 1,99% até 3,74%. Graficamente estes valores em conjunto com o valor medido do item 4.1 são mostrados na FIGURA 35, que apresenta um comparativo visual dos métodos de estimativa de rugosidade de rocha conjuntamente com o desvio padrão dos diferentes métodos de composição de rugosidades.

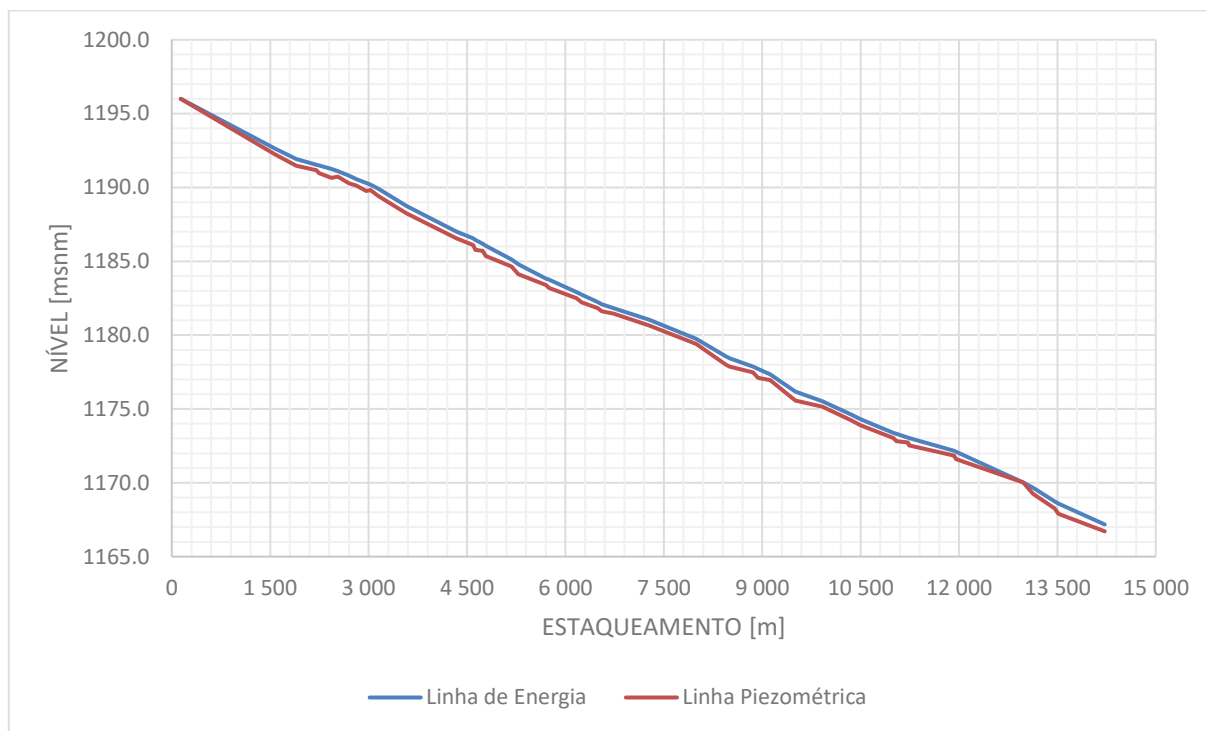
FIGURA 35 – PERDAS DE CARGA TOTAIS CALCULADAS NO CIRCUITO DE GERAÇÃO



Uma outra maneira de visualizar as perdas de carga ao longo do túnel é através de uma plotagem da linha piezométrica e da linha de energia ao longo do estaqueamento. Para tanto utilizou-se os valores obtidos pelos métodos de

Colebrook e Média Ponderada, somados às perdas localizadas e adicionais, onde pretende-se apresentar assim somente uma ordem de grandeza das perdas ao longo do túnel, conforme é possível ver na FIGURA 36.

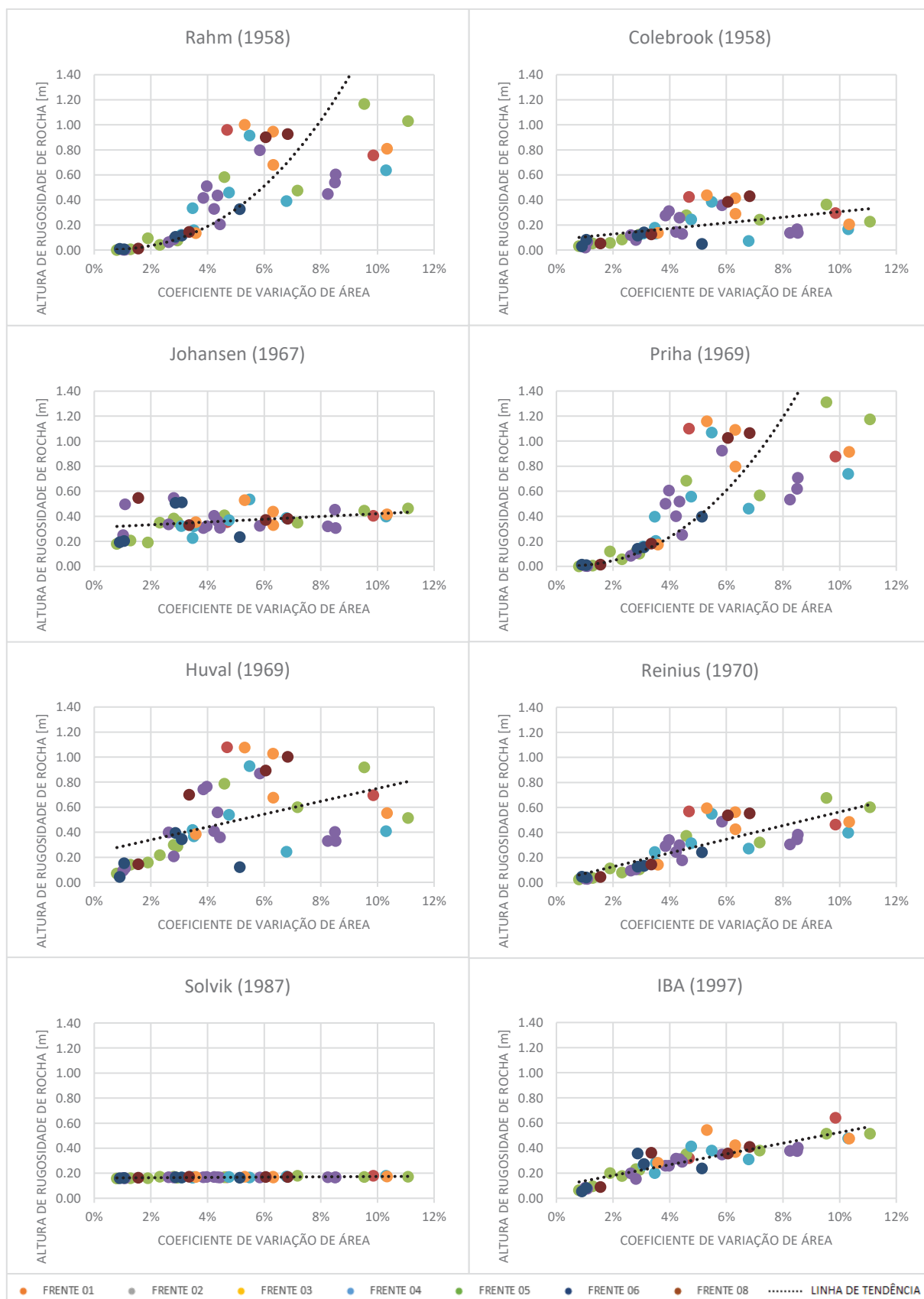
FIGURA 36 – LINHAS DE ENERGIA E PIEZOMÉTRICA AO LONGO DO TÚNEL, PARA AS PERDAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS DE COLEBROOK E MÉDIA PONDERADA



4.4 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

Partindo da revisão apresentada no item 2.2 foi possível realizar uma análise mais aprofundada dos resultados obtidos nas diferentes frentes de escavação. Num primeiro momento, para verificar a influência da variação de área no cálculo da rugosidade, os resultados foram plotados em relação ao respectivo coeficiente de variação de área, já citado no item 4.2. Estes gráficos são apresentados na FIGURA 37, onde os pontos representam a altura de rugosidade obtida em cada trecho, e as linhas pontilhadas foram traçadas para indicar qualitativamente a tendência de cada gráfico.

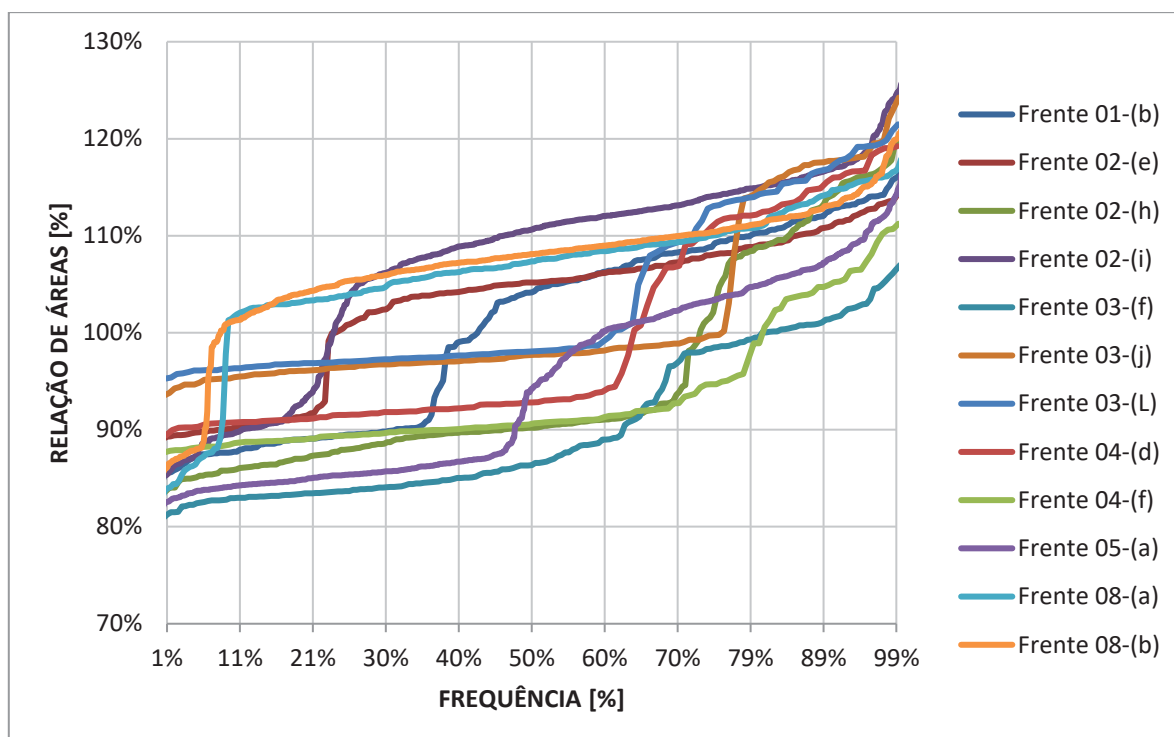
FIGURA 37 – RUGOSIDADES DE ROCHA EM FUNÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE ÁREA



Os resultados calculados conforme métodos de *Rahm* (1958) e *Priha* (1969) apresentaram tendência próxima, como era de se esperar levando-se em conta que um deriva diretamente do outro. No entanto, verificando estes métodos com maior atenção em alguns trechos, fica nítido que a definição do parâmetro de rugosidade como sendo uma reta entre as áreas com frequência de 1% a 99% torna-se uma aproximação que nem sempre pode ser aplicada.

Como mostra a FIGURA 38, em diversos trechos as áreas apresentam um degrau em alguma frequência entre os valores limites, ou seja, possuem um comportamento linear de distribuição de áreas até certa frequência, de onde ocorre então um salto na relação de áreas. A partir deste ponto há um grande incremento no valor das áreas, que continuam com uma tendência linear de crescimento após este salto. Ao se aproximar estes “degraus” através de uma reta, conforme sugere o método de *Rahm* (1958), ignora-se o fato de haver uma grande diferença entre áreas ao longo de todo o trecho escavado. Esta aproximação pode levar então a possíveis erros na estimativa do valor de rugosidade, como uma suavização de trechos com grandes variações de áreas.

FIGURA 38 – GRÁFICO DAS DISTRIBUIÇÕES DE ÁREAS EM FUNÇÃO DE SUA FREQUÊNCIA



Reinius (1970) também utilizou o mesmo princípio de estimar um coeficiente de rugosidade através desta reta, porém utilizando uma nova base de dados, mais

atuais que *Rahm* (1958). No entanto, de maneira similar, esta metodologia fica sujeita a possíveis erros nos casos em que ocorram estes saltos de áreas.

De acordo com *Wright* (1971), a adoção desta aproximação linear do parâmetro de rugosidade resulta em grandes discrepâncias na medida em que se aumenta o valor da rugosidade relativa. Isto pode indicar a diferença de comportamento das amostras na FIGURA 37, onde os métodos de *Rahm* (1958) e *Priha* (1969) apresentaram um aumento exponencial da rugosidade conforme o incremento de variação de área, enquanto todos os outros métodos se aproximaram a relações lineares.

Dentre os métodos que seguem uma aproximação linear dos resultados, *Huval* (1969) foi o que apresentou a maior dispersão, principalmente na região de maior variação de área. Como já explicado anteriormente, este método considera como um dos parâmetros principais a menor área medida no trecho, portanto uma grande dispersão era esperada. Além disso, a grande dispersão na região acima de 3% do coeficiente de variação de área indica que o método de *Huval* (1969) possui baixa eficácia para a análise de rugosidades de túneis já escavados.

O método de *Johansen* (1966) adota como um dos parâmetros principais as áreas nominais de projeto de cada trecho de túnel, apresentando certa dispersão nos valores de menor variação de área, como visto na FIGURA 37. Outro ponto importante que chama a atenção neste resultado é o fato de que para estes trechos com poucas variações de área a altura de rugosidade apresenta um valor médio próximo daqueles com grandes variações de áreas. Ou seja, neste método há pouca influência da variação de área, onde provavelmente os parâmetros experimentais adotados pelo autor possuem maior peso no resultado final do que as medições em si.

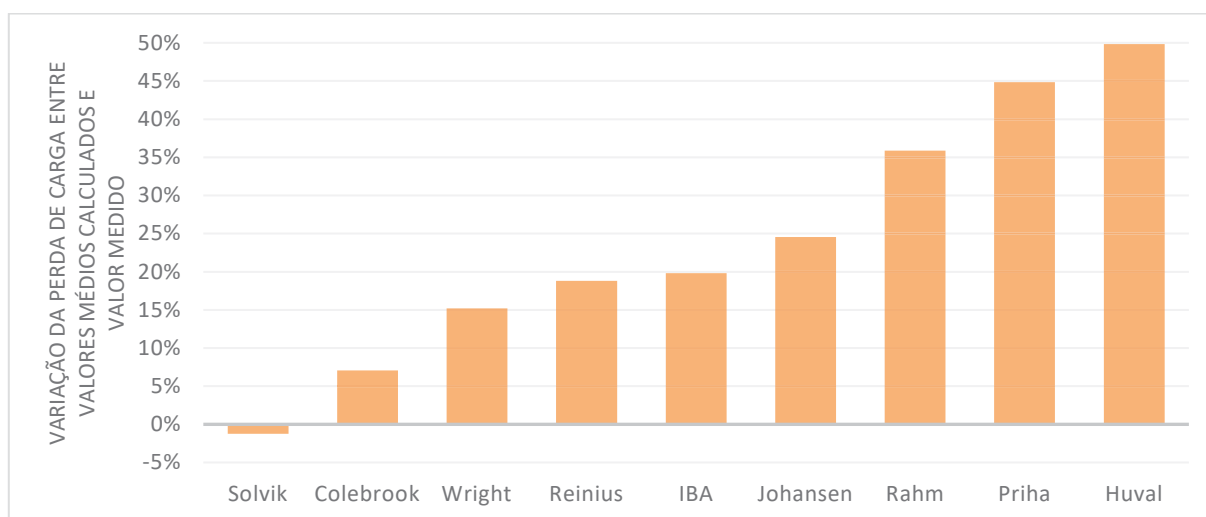
Além desses métodos, outro que também apresentou resultados cuja variação de área pouco impactou foi o de *Solvik* (1988). Neste método ficou nítido o peso do parâmetro experimental definido pelo autor para rugosidade de parede, pois praticamente não houve alterações na rugosidade em função da variação de área.

Finalmente, os três últimos métodos analisados neste trabalho apresentaram um comportamento similar: *Colebrook* (1958), *Reinius* (1970) e *IBA* (RONN e SKOG, 1997). Dentre os três, o método de *IBA* foi o que apresentou maior aderência à aproximação linear, algo esperado quando se leva em conta o modelo matemático que o mesmo utiliza.

Posteriormente, ao se analisar os valores de perda de carga totais apresentados no item 4.3 e na FIGURA 35, em conjunto com a análise apresentada logo acima, é possível chegar a algumas conclusões importantes deste estudo de metodologias de estimativa de rugosidade de rocha.

Comparando percentualmente as médias dos resultados da TABELA 19 e FIGURA 35, obtidos através dos métodos de estimativa e composição de rugosidade, com o valor obtido por medição direta nas turbinas é possível identificar quais métodos estão mais próximos desta medição. Para auxiliar nesta análise, os valores percentuais são ordenados em ordem crescente e plotados na FIGURA 39.

FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA ENTRE VALORES CALCULADOS E VALOR MEDIDO



Os dois métodos que mais se aproximam do valor medido são de *Solvik* (1988) e *Colebrook* (1958), variando de -1,2% a 7,1% de diferença.

O método de *Solvik* (1988), como visto anteriormente, não apresentou variações na rugosidade ao longo dos diferentes trechos escavados, o que demonstra que o resultado foi obtido principalmente devido aos parâmetros experimentais adotado pelo autor. Coincidentemente estes parâmetros forneceram um resultado próximo ao medido no túnel estudado. No entanto para outros túneis com técnicas de escavação e de tratamento diferentes existe grande possibilidade destes resultados não se aproximarem do valor medido no local. Devido a este fato conclui-se que o método de *Solvik* (1988) deve ser evitado para se estimar a rugosidade de rocha.

Colebrook (1958) apresentou um método cujo resultado de perda de carga média ficou 7,1% acima do valor medido, onde é possível ver na FIGURA 37 que a

rugosidade de rocha estimada pelo mesmo apresenta uma tendência crescente linear em relação à variação de área. Esta tendência linear, em conjunto com a pequena variação em relação ao valor medido, permite concluir que o método de *Colebrook* (1958) dentre todos os métodos analisados foi o que apresentou os melhores resultados, sendo recomendado para futuras análises de rugosidade de rocha.

Os próximos métodos a apresentarem resultados aproximados ao valor medido foram *Wright* (1971), *Reinius* (1970) e IBA (RONN e SKOG, 1997), com perdas variando de 15,2% até 19,8% acima deste valor.

O resultado obtido pelo método de *Wright* (1971) ficou em média 15,2% acima do valor medido. Levando-se em conta que este método determina o coeficiente de rugosidade composto sem a necessidade de estimar uma rugosidade de rocha, não foi possível avaliar a relação entre esta última e a variação de áreas. Além disso, considerando que o autor deste método verificou a não linearidade do método de *Rahm* (1958) e propôs uma alternativa ao mesmo de maneira a corrigir esta discrepância, incluindo em sua análise túneis com piso revestido, o mesmo pode ser utilizado na estimativa de rugosidade em túneis com características similares ao deste estudo, atentando-se no entanto ao resultado final, cuja diferença com o valor medido ficou na ordem de 15% acima. Cabe alertar ainda que a metodologia proposta pelo autor para a determinação do coeficiente de rugosidade de túneis escavados unicamente em rocha não fez parte deste trabalho e, portanto, não deve ser considerada nesta análise.

Os resultados obtidos pelo método de *Reinius* (1970) são tais que, apesar de apresentar um valor de perda de carga próximo ao medido, seguem a metodologia proposta por *Rahm* (1958), a qual está sujeita a erros em função dos saltos na distribuição de área conforme já discutido acima e apresentado na FIGURA 38. Desta maneira o uso do método proposto por *Reinius* (1970) para a estimativa de rugosidade de rocha deve ser evitado em túneis que apresentem características similares, dando prioridade a outras metodologias.

O resultado obtido pelo método IBA (RONN e SKOG, 1997) ficou em sua média 19,8% acima do valor medido. Este é um valor intermediário dentre todos os resultados apresentados neste trabalho. Porém, ao se considerar o modelo matemático empregado e a grande correlação entre rugosidades medidas e variação de áreas, pode-se utilizar este método na determinação da rugosidade de rocha em

túneis, mantendo a ressalva de que o mesmo poderá apresentar no cálculo pós composição de rugosidades valores de perda de carga 20% acima do valor medido em túneis similares. Desta maneira este método pode ser utilizado em futuras análises de túneis escavados em rocha, devendo-se verificar as possíveis implicações da ressalva destacada acima.

Na sequência o método de *Johansen* (1966) apresentou resultados próximos ao método IBA, com um valor calculado médio 24,5% acima do medido. Contudo, ao se considerar que este método utiliza como parâmetro base a área de escavação nominal do projeto e coeficientes de correção obtidos experimentalmente, deve-se ter certa cautela na utilização do mesmo para a determinação de rugosidades em túneis com características distintas ao deste trabalho. Outro ponto que se deve observar ao utilizar este método é a tendência da rugosidade em função da variação de área, verificando se a mesma apresenta valores crescentes ao invés da proximidade com a constância como foi verificado nos resultados na FIGURA 37.

Finalmente, os três valores cujos resultados estão mais afastados da perda de carga medida no local foram obtidos pelos métodos de *Rahm* (1958), *Priha* (1969) e *Huval* (1969) com uma variação de 35,9% a 49,8% acima do valor medido.

Considerando a semelhança entre os métodos de *Rahm* (1958) e *Priha* (1969), assim como os possíveis erros resultantes da aproximação por uma reta da distribuição de áreas em determinados trechos, conforme visto na FIGURA 38, ambos métodos não são indicados para estimar a rugosidade de rocha em túneis de características semelhantes ao analisado.

Para o método de *Huval* (1969), conforme explicitado anteriormente, o mesmo não é indicado para a verificação da rugosidade de túneis já escavados, pois apresenta grande dispersão na estimativa de rugosidade em função da grande variação de área média e mínima nos diferentes trechos estudados. Isto ficou nítido no resultado final, sendo este o método que apresentou o valor mais distante do medido.

4.5 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

As composições de rugosidade entre concreto e rocha foram realizadas para praticamente todos os métodos de estimativa de rugosidade de rocha, com exceção do método proposto por *Wright* (1971). Este último prevê metodologias distintas para

estimar a rugosidade de um túnel escavado somente em rocha e um túnel escavado em rocha com piso revestido em concreto.

Dessa maneira foram aplicados 4 métodos de composição de rocha nos valores calculados através dos 8 métodos de estimativa de rugosidade de rocha, resultando num total de 32 valores diferentes de rugosidade rocha/concreto compostas em cada trecho. Os resultados contendo as médias das perdas contínuas em cada trecho foram apresentados no item 4.2, enquanto os valores de perdas contínuas totais estão resumidas na TABELA 18.

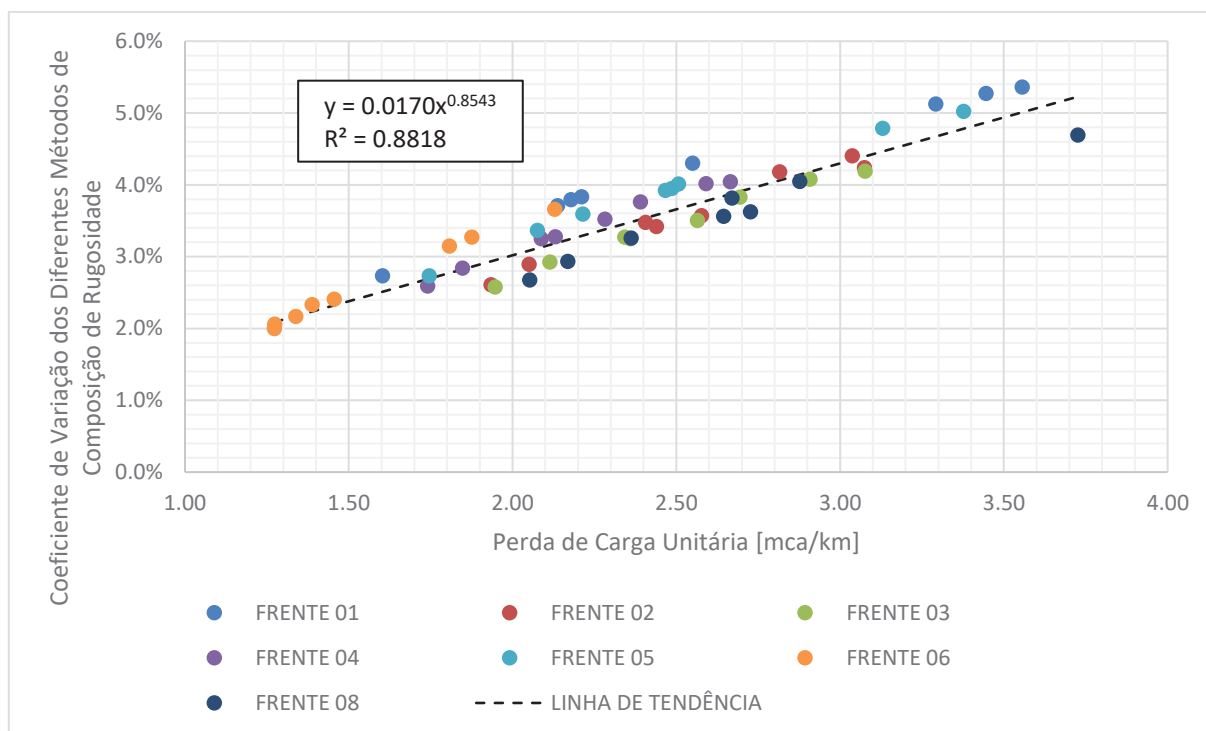
Partindo desses resultados foi possível observar inicialmente de maneira qualitativa pouca variação entre os métodos de rugosidade, principalmente naqueles que apresentavam resultados com valores mais baixos.

Posteriormente, ao se avaliar utilizando como parâmetros principais o desvio padrão em cada método de estimativa de rugosidade em conjunto com o coeficiente de variação relativo a este desvio, foi possível observar variações pequenas ao redor do valor médio. Dentro dos valores totais de perda de carga distribuída, os valores de desvio padrão ficaram numa faixa entre 0,61m até 1,66m desta perda de carga calculada.

Ao se analisar o coeficiente de variação das perdas em cada frente, ou seja, a relação entre o desvio padrão e o valor médio das perdas distribuídas, observa-se que os mesmos se encontram numa faixa de 2,00% até 5,12% de variação, com uma dispersão baixa.

Para verificar estes coeficientes de variação nos diferentes trechos, os mesmos foram distribuídos graficamente na FIGURA 40 em função das perdas de carga unitárias médias calculadas para cada método de estimativa de rugosidade.

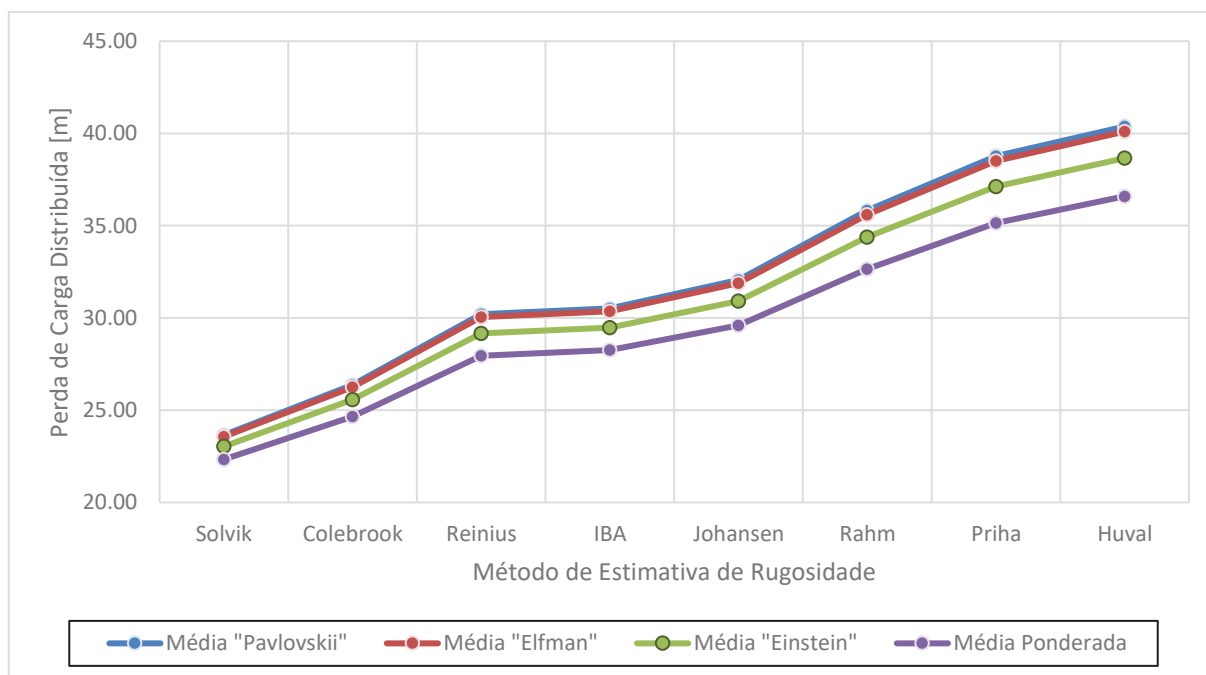
FIGURA 40 – COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DOS MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DAS PERDAS DE CARGA UNITÁRIAS MÉDIAS



É interessante notar que a distribuição destes coeficientes de variação possui uma tendência quase linear no trecho estudado em relação às perdas unitárias, ou seja, quanto maior a perda de carga por metro em um dado trecho maior será a dispersão entre os métodos de composição de rugosidade. Estendendo o gráfico para trechos com menores perdas de carga unitárias a tendência é de reduzir o coeficiente de variação até zero, enquanto que para pontos acima dos valores medidos a tendência do gráfico se mantém praticamente constante.

Outra característica observada ao longo deste estudo foi uma constância entre os resultados obtidos nos diferentes métodos. Em todas as frentes e metodologias de estimativa de rugosidade o método de composição que forneceu os maiores valores de rugosidade foi o de *Pavlovskii* (1931), seguido pelo método de *Elfman* (1993). Na sequência o método de *Einstein* (1934) resultou em valores intermediários, enquanto o método de composição que forneceu os menores valores de rugosidade foi o da média ponderada. Na FIGURA 41 é possível verificar visualmente esta característica em todos os métodos de estimativa de rugosidade.

FIGURA 41 – PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS CALCULADAS NOS DIFERENTES MÉTODOS DE PONDERAÇÃO



Dentre os métodos sugeridos para estimar a rugosidade de rocha no item 0, *Colebrook* (1958) foi o que apresentou um dos resultados mais próximos do medido, com um coeficiente de Manning de $0,027 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ e uma altura de rugosidade composta de 137mm. *Wright* (1971) apresentou um resultado um pouco mais afastado do valor medido, com um coeficiente Manning de $0,028 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ e uma altura de rugosidade composta de 167mm. O método IBA (RONN e SKOG, 1997), que apresentou um resultado intermediário dentre todos, obteve como coeficiente Manning um valor de $0,029 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ e uma altura de rugosidade composta de 186mm.

Por fim o autor de um dos métodos de estimativa de rugosidade, *Wright* (1971), alerta que ao se comporem rugosidades de túneis em rocha com piso revestido em concreto por métodos como os utilizados acima, pode-se chegar a resultados sobre-estimados de perda de carga. Nos estudos apresentados, *Wright* (1971) obteve uma diferença que variou de 24% a 35% a mais no coeficiente de perda de carga entre o cálculo que compôs as rugosidades (método de *Pavlovskii* (1931)) e os valores medidos diretamente nos túneis (WRIGHT, 1971). Esta conclusão, em conjunto com os resultados apresentados neste trabalho, deve ser levada em consideração ao se estimar a rugosidade de um túnel compondo as rugosidades de acabamento do mesmo, em rocha nas paredes e teto e concreto no piso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desse trabalho foi possível delinear a grande importância que a definição de uma metodologia tem para o cálculo das rugosidades e perdas de carga em túneis com piso revestido em concreto.

Quando se leva em consideração a grande variação dessas metodologias aplicadas durante o período de projeto e início de escavação de túneis de adução de usinas hidrelétricas, vê-se o impacto resultante. Valores sobrestimados de rugosidade e perda de carga levam ao incremento da seção de escavação, que resulta em maiores custos construtivos, enquanto que valores subestimados aumentam o risco de gerar menos energia do que o previsto, resultando em custos e possíveis multas para o empreendedor.

Em vista destes pontos nota-se que o resultado obtido nesse estudo possui grande valia para futuros projetos, demonstrando que a melhor metodologia para calcular a perda de carga de um túnel com piso revestido em concreto é estimando a rugosidade de rocha pelo método de *Colebrook* (1958), compondo a rugosidade por média ponderada. Aplicando essa metodologia no túnel estudado resultou num valor de coeficiente de Manning de $0,027\text{m}^{-1/3}.\text{s}$ e altura de rugosidade de 137mm, que forneceram os valores mais próximos da perda de carga medida.

Além deste método de estimativa de rugosidade, os métodos IBA (RONN e SKOG, 1997) e de *Wright* (1971) também podem ser utilizados, porém deve-se levar em conta que os mesmos poderão apresentar um resultado sobre-estimado de perda de carga.

Com relação aos outros métodos de composição de rugosidade, *Pavlovskii* (1931), *Elfman* (1993) e *Einstein* (1934), também resultaram em pequena variação que não representa grande impacto no valor final de perda de carga.

Este estudo foi aplicado em um único túnel específico, portanto, caberia novos estudos similares aplicados em outros túneis, de maneira a confrontar os resultados obtidos. Além disso, seria interessante realizar um estudo em laboratório para identificar quais efeitos regem e motivam a diferença observada por *Wright* (1971) entre rugosidades medidas e compostas para túneis escavados em rocha com piso revestido em concreto.

REFERÊNCIAS

BISHWAKARMA, M. B. Computation of Head Losses in Hydro Power Tunnels. **Dam Engineering**, Kent, v. XXIII, n. 2, p. 1-15, 2013.

BURRI, E.; PETITTA, M. Water for agricultural and human needs in the Fucino area (central Italy), Rome, p. 67-76, 2003.

CASTRO, I. R. Comportamiento hidráulico en modelo reducido de túneles de sección portal trabajando a presión con rugosidad compuesta, Cidade do México, p. 114, 2007.

CHOW, V. T. **Hidráulica de Canales Abiertos**. Bogotá: McGraw-Hill, 1994.

COLEBROOK, C. F. The Flow of Water in Unlined, Lined, and Partly Lined Rock Tunnels. **Proceedings of the Institution of Civil Engineering**, p. 103-132, Setembro 1958.

COLEBROOK, C. F.; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 161, p. 367-381, 1937.

EINSTEIN, H. A. Der Hydraulische oder Profil-Radius. **Schweizerische Bauzeitung**, Zurique, v. 103, p. 89-91, 1934.

ELFMAN, S. Hydropower Tunnels: Estimation of Head Losses. **Dam Engineering**, Hasselby, v. 147, 1993.

FABIANI, A. L. T.; OLINGER, J. C.; TOZZI, M. Distribuição de velocidades em desemboques de túneis de desvio com seção transversal arco-retângulo. **XVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, Guayaquil, p. 211-222, Outubro 1996.

GARNAYAK, M. K. **Hydraulic head losses in an unlined pressure tunnel of a high head power plant**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Paris, p. 18. 2001.

HAALAND, S. E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. **Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering**, v. 105, p. 89-90, 1983.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. 1^a. ed. Nova York: Macmillan Publishing Co., 1966.

HORTON, R. E. Separate roughness coefficients for channel bottoms and sides. **Eng. News-Rec.**, v. 111, p. 652-653, 1933.

HUVAL, C. J. Hydraulic design of unlined rock tunnels. **Journal of the Hydraulics Division**, p. 1235-1246, Julho 1969.

IDELCHIK, I. E. **Handbook of Hydraulic Resistance**. 4^a. ed. New York: Begell House, 2008.

JOHANSEN, F. **Head loss investigation in unlined rock tunnels**. River and Harbour Research Laboratory, Tech. University of Norway. Trondheim, p. 29. 1966.

LEVIN, L. **Formulaire des Conduites Forcées, Oléoducs et Conduits d'Aération**. 1^a. ed. Paris: Dunod, v. I, 1968.

OTA, J. J.; MODENESI, H. A.; CARNEIRO, M. **Comportamento hidráulico de túneis de desvio**: Estudo aplicado aos túneis de Nova Ponte. Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Gramado - RS: ABRH. 1993.

PAVLOVSKII, N. N. K Voporosu o Raschetnoi dlia Ravnomernogo Dvizheniia v Vodotokahk s Neodnorodnymi Stenkami. **Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki**, v. 3, p. 157-164, 1931.

PRIHA, S. Hydraulic properties of small unlined rock tunnels. **Journal of the Hydraulic Division**, p. 1181-1209, Julho 1969.

RAHM, L. Friction Losses in Swedish Rock Tunnels. **Water Power**, Stockholm, p. 457-464, Dezembro 1958.

REINIUS, E. Head losses in unlined rock tunnels. **Water Power**, p. 246-252, Julho/Agosto 1970.

RENNELS, D.; HUDSON, H. **Pipe Flow**. 1^a. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

RONN, P.-E.; SKOG, M. **New method for estimation of head loss in unlined water tunnels**. Hydropower 973rd Intl Conference. Rotterdam: CRC Press. Julho 1997.

SOLVIK, O. Roughness and roughness analysis of unlined blasted and TBM-bored hydro power tunnels in Norway. **International Symposium: Tunnelling for Water Resource & Power**, Nova Deli, 1988.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B.; BEDFORD, K. W. **Mecánica de Fluidos**. Tradução de Juan G. Saldarriaga e Germán R. Santos. 9^a. ed. Bogotá: McGraw-Hill, 1999.

WOOD, A. M. **Tunneling**: management by design. 1^a. ed. Londres: Taylor & Francis Group, 2000.

WRIGHT, D. E. **The hydraulic design of unlined and lined-invert rock tunnels**. CIRIA - Construction Industry Research and Information Association. Londres, p. 31. 1971.

YEN, B. C. Open Channel Flow Resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, p. 20-39, Janeiro 2002.

APÊNDICE A – PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS NO TÚNEL

A seguir são apresentados resumidamente os parâmetros e resultados dos cálculos efetuados na determinação das rugosidades e perdas de cargas contínuas das diferentes frentes de escavação do túnel de adução.

1 FRENTE 01

1.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A1.1 – FRENTE 01 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)
V_{med} [m/s]:		2.5452	2.7057
Re:		2.11E+07	2.17E+07
IBA	rms_p [m]:	0.2206	0.4455
	rms_a [m]:	0.0976	0.1955
	ϵ [m]:	0.3181	0.6410
	f:	0.0637	0.0902
HUVAL	A_n [m ²]:	45.17	46.64
	A_m [m ²]:	58.93	55.44
	ϵ [m]:	1.0785	0.6953
	f:	0.1186	0.0942
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	46.42	47.18
	$A_{99\%}$ [m ²]:	64.87	63.89
	δ [%]:	39.74	35.42
	ϵ [m]:	0.9584	0.7558
	f:	0.1106	0.0985
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	8.2837	8.0297
	$D_{h_1\%}$ [m]:	7.4356	7.4392
	t_m [m]:	0.4240	0.2952
	ϵ [m]:	0.4240	0.2952
	f:	0.0725	0.0625
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	46.42	47.18
	δ [%]:	39.74	35.42
	f:	0.1200	0.1071
REINIUS	δ [%]:	39.74	35.42
	f_{inf} :	0.0638	0.0601
	f_{sup} :	0.1173	0.1056
	f:	0.0836	0.0767
WRIGHT	t_n [m]:	0.4728	0.3815
	$R_{50\%}$ [m]:	2.0729	2.0365
	$t_n/R_{50\%}$:	0.2281	0.1874
JOHANSEN	ϵ [m]:	0.3538	0.4041
	f:	0.0667	0.0719
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0179	0.0282
	ϵ [m]:	0.1679	0.1782
	f:	0.0490	0.0507

1.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A1.2 – FRENTE 01 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0275	0.0363	0.0351	0.0291	0.0365	0.0310	0.0281	0.0246
	f:	0.0467	0.0809	0.0760	0.0523	0.0818	0.0593	0.0487	0.0373
	S [mca/km]:	1.8620	3.2253	3.0308	2.0849	3.2614	2.3628	1.9396	1.4869
(b)	n:	0.0320	0.0327	0.0333	0.0273	0.0346	0.0298	0.0290	0.0249
	f:	0.0639	0.0664	0.0691	0.0462	0.0744	0.0553	0.0523	0.0387
	S [mca/km]:	2.9687	3.0841	3.2099	2.1489	3.4585	2.5704	2.4301	1.7968

QUADRO A1.3 – FRENTE 01 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0286	0.0385	0.0372	0.0304	0.0387	0.0326	0.0293	0.0254
	f:	0.0505	0.0913	0.0854	0.0570	0.0923	0.0653	0.0528	0.0396
	S [mca/km]:	2.0123	3.6372	3.4021	2.2737	3.6809	2.6023	2.1030	1.5783
(b)	n:	0.0337	0.0344	0.0351	0.0283	0.0366	0.0312	0.0302	0.0257
	f:	0.0706	0.0735	0.0768	0.0498	0.0832	0.0604	0.0569	0.0411
	S [mca/km]:	3.2803	3.4177	3.5678	2.3158	3.8654	2.8090	2.6441	1.9093

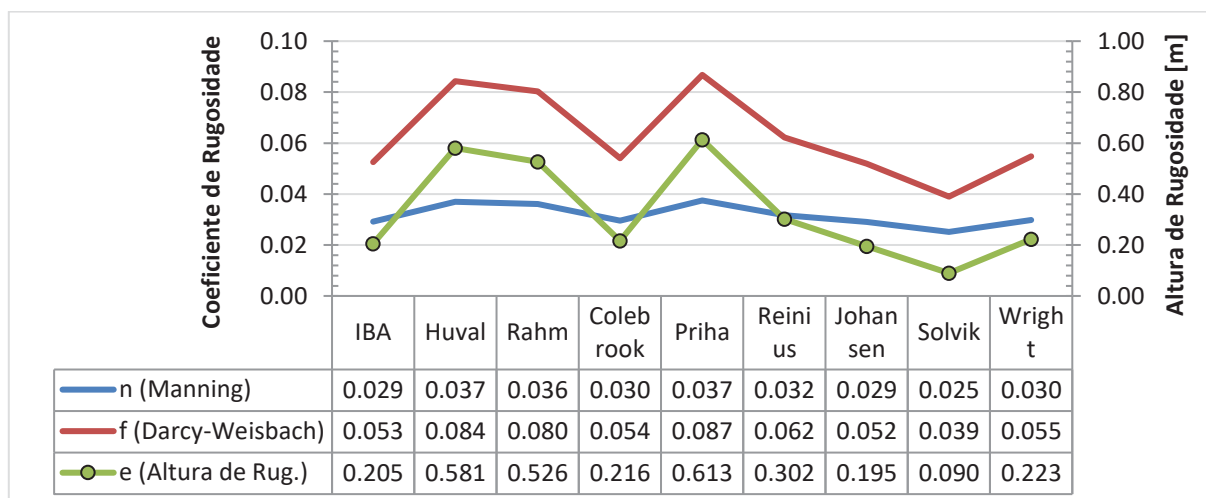
QUADRO A1.4 – FRENTE 01 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0281	0.0375	0.0363	0.0299	0.0377	0.0319	0.0287	0.0250
	f:	0.0487	0.0866	0.0812	0.0549	0.0876	0.0625	0.0509	0.0385
	S [mca/km]:	1.9427	3.4521	3.2347	2.1868	3.4925	2.4928	2.0274	1.5354
(b)	n:	0.0329	0.0336	0.0343	0.0278	0.0357	0.0306	0.0297	0.0253
	f:	0.0675	0.0703	0.0733	0.0482	0.0792	0.0581	0.0548	0.0400
	S [mca/km]:	3.1385	3.2662	3.4057	2.2384	3.6818	2.6995	2.5456	1.8566

QUADRO A1.5 – FRENTE 01 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “EINSTEIN”		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0502	0.0905	0.0847	0.0567	0.0916	0.0649	0.0525	0.0394
	S [mca/km]:	2.0021	3.6066	3.3748	2.2606	3.6496	2.5854	2.0918	1.5722
(b)	f:	0.0701	0.0730	0.0762	0.0496	0.0825	0.0601	0.0566	0.0409
	S [mca/km]:	3.2572	3.3928	3.5410	2.3038	3.8346	2.7916	2.6286	1.9014

FIGURA A1.1 – FRENTE 01 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



1.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A1.6 – FRENTE 01 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 01	(a)	(b)	TOTAL
L_{fr} [km]:	1.435	0.326	1.761
$h_{f,loc}$ [m]:	-	0.001	0.001

QUADRO A1.7 – FRENTE 01 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	2.672	4.628	4.349	2.992	4.680	3.391	2.783	2.134
(b)	0.968	1.005	1.046	0.701	1.127	0.838	0.792	0.586
SUB-TOTAL [m]	3.641	5.634	5.396	3.693	5.808	4.229	3.576	2.720

QUADRO A1.8 – FRENTE 01 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	2.888	5.219	4.882	3.263	5.282	3.734	3.018	2.265
(b)	1.069	1.114	1.163	0.755	1.260	0.916	0.862	0.622
SUB-TOTAL [m]	3.958	6.334	6.046	4.018	6.543	4.651	3.881	2.888

QUADRO A1.9 – FRENTE 01 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	2.788	4.954	4.642	3.138	5.012	3.577	2.909	2.203
(b)	1.023	1.065	1.110	0.730	1.200	0.880	0.830	0.605
SUB-TOTAL [m]	3.812	6.019	5.753	3.869	6.213	4.458	3.740	2.809

QUADRO A1.10 – FRENTE 01 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	2.873	5.175	4.843	3.244	5.237	3.710	3.002	2.256
(b)	1.062	1.106	1.154	0.751	1.250	0.910	0.857	0.620
SUB-TOTAL [m]	3.936	6.282	5.998	3.996	6.488	4.621	3.859	2.877

FIGURA A1.2 – FRENTE 01 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

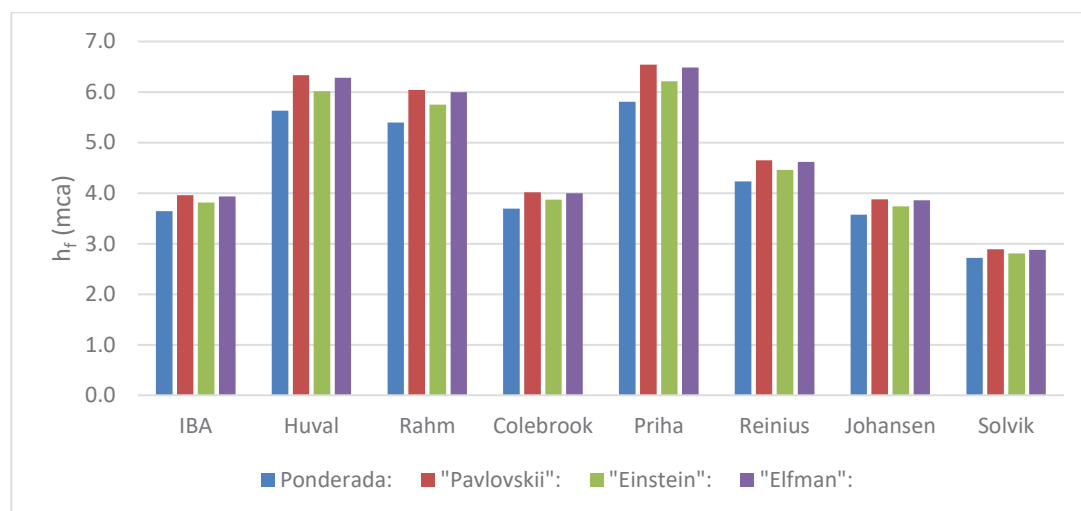
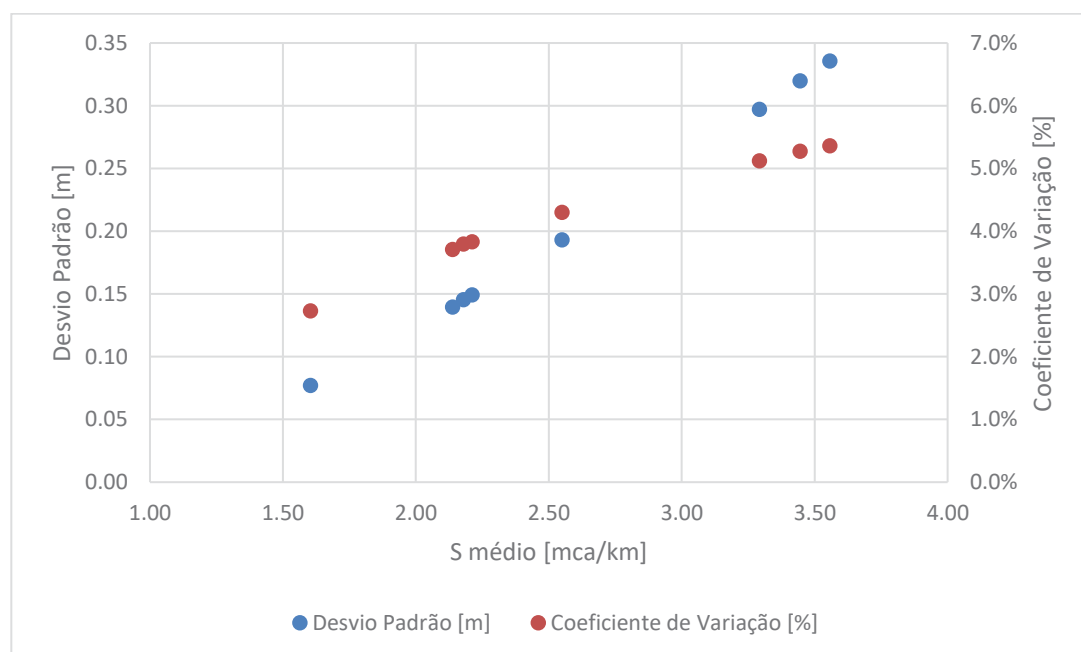


FIGURA A1.3 – FRENTE 01 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



2 FRENTE 02

2.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A2.1 – FRENTE 02 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
V_{med} [m/s]:		2.5320	2.9557	2.5252	3.0179	2.6416	3.0494	2.5012	2.8609	2.7891	2.7135
Re:		2.11E+07	2.30E+07	2.10E+07	2.32E+07	2.16E+07	2.33E+07	2.08E+07	2.26E+07	2.21E+07	2.18E+07
IBA	rms_p [m]:	0.1300	0.0490	0.1654	0.1644	0.2349	0.0708	0.1740	0.3060	0.3250	0.2591
	rms_a [m]:	0.0470	0.0150	0.0599	0.0348	0.1453	0.0238	0.0573	0.2069	0.1895	0.0909
	ϵ [m]:	0.1771	0.0640	0.2254	0.1992	0.3801	0.0946	0.2313	0.5129	0.5144	0.3499
	f:	0.0499	0.0356	0.0550	0.0540	0.0694	0.0409	0.0555	0.0813	0.0813	0.0674
HUAL	A_n [m ²]:	56.31	49.87	55.55	47.75	49.06	47.45	55.94	46.06	42.52	45.40
	A_m [m ²]:	59.24	50.75	59.40	49.70	56.78	49.19	59.97	52.43	53.78	55.28
	ϵ [m]:	0.2178	0.0703	0.2864	0.1578	0.5996	0.1414	0.2987	0.5128	0.9174	0.7866
	f:	0.0542	0.0367	0.0607	0.0492	0.0865	0.0473	0.0618	0.0813	0.1107	0.1008
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	56.29	49.91	55.64	48.25	49.21	47.81	56.49	46.16	42.85	47.49
	$A_{99\%}$ [m ²]:	62.45	52.14	63.03	55.30	62.84	50.87	64.33	65.84	62.52	62.16
	δ [%]:	10.93	4.46	13.27	14.62	27.71	6.40	13.90	42.63	45.90	30.89
	ϵ [m]:	0.0411	0.0009	0.0758	0.0932	0.4749	0.0049	0.0870	1.0290	1.1665	0.5816
	f:	0.0303	0.0124	0.0368	0.0406	0.0770	0.0177	0.0386	0.1187	0.1278	0.0859
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	8.3279	7.7884	8.3108	7.6903	8.1614	7.6563	8.3226	7.8885	7.9173	8.0183
	$D_{h_1\%}$ [m]:	8.1586	7.7246	8.0645	7.5780	7.6768	7.5502	8.1040	7.4340	7.1908	7.4626
	t_m [m]:	0.0846	0.0319	0.1232	0.0561	0.2423	0.0531	0.1093	0.2272	0.3632	0.2779
	ϵ [m]:	0.0846	0.0319	0.1232	0.0561	0.2423	0.0531	0.1093	0.2272	0.3632	0.2779
	f:	0.0382	0.0287	0.0436	0.0342	0.0570	0.0337	0.0417	0.0563	0.0689	0.0609
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	56.29	49.91	55.64	48.25	49.21	47.81	56.49	46.16	42.85	47.49
	δ [%]:	10.93	4.46	13.27	14.62	27.71	6.40	13.90	42.63	45.90	30.89
	f:	0.0335	0.0135	0.0406	0.0443	0.0841	0.0194	0.0426	0.1287	0.1377	0.0935
REINIUS	δ [%]:	10.93	4.46	13.27	14.62	27.71	6.40	13.90	42.63	45.90	30.89
	f_{inf} :	0.0393	0.0338	0.0413	0.0424	0.0536	0.0354	0.0418	0.0662	0.0690	0.0563
	f_{sup} :	0.0395	0.0220	0.0458	0.0495	0.0848	0.0273	0.0475	0.1251	0.1339	0.0934
	f:	0.0375	0.0271	0.0412	0.0434	0.0643	0.0302	0.0422	0.0882	0.0934	0.0694
WRIGHT	t_n [m]:	0.1058	0.0324	0.1388	0.0522	0.3253	0.0540	0.1178	0.1402	0.4931	0.2927
	$R_{50\%}$ [m]:	2.0821	1.9476	2.0822	1.9201	2.0587	1.9137	2.0763	1.9311	2.0049	2.0059
	$t_n/R_{50\%}$:	0.0508	0.0167	0.0667	0.0272	0.1580	0.0282	0.0568	0.0726	0.2460	0.1459
JOHA	ϵ [m]:	0.3484	0.1797	0.3553	0.1910	0.3487	0.2056	0.3817	0.4624	0.4442	0.4074
	f:	0.0661	0.0515	0.0667	0.0531	0.0667	0.0547	0.0689	0.0773	0.0757	0.0722
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0209	0.0084	0.0134	0.0099	0.0293	0.0091	0.0207	0.0204	0.0196	0.0179
	ϵ [m]:	0.1709	0.1584	0.1634	0.1599	0.1793	0.1591	0.1707	0.1704	0.1696	0.1679
	f:	0.0492	0.0491	0.0484	0.0495	0.0505	0.0495	0.0492	0.0502	0.0500	0.0496

2.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A2.2 – FRENTE 02 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0249	0.0258	0.0202	0.0222	0.0210	0.0221	0.0281	0.0247
	f:	0.0381	0.0408	0.0251	0.0304	0.0272	0.0299	0.0485	0.0376
	S [mca/km]:	1.4935	1.6022	0.9832	1.1910	1.0674	1.1726	1.9040	1.4762
(b)	n:	0.0215	0.0218	0.0141	0.0197	0.0146	0.0192	0.0252	0.0247
	f:	0.0291	0.0299	0.0125	0.0243	0.0133	0.0232	0.0399	0.0383
	S [mca/km]:	1.6636	1.7078	0.7130	1.3894	0.7623	1.3270	2.2833	2.1885
(c)	n:	0.0259	0.0270	0.0219	0.0235	0.0228	0.0229	0.0282	0.0245
	f:	0.0412	0.0449	0.0294	0.0338	0.0319	0.0323	0.0487	0.0370
	S [mca/km]:	1.6117	1.7567	1.1486	1.3229	1.2473	1.2626	1.9065	1.4463
(d)	n:	0.0256	0.0246	0.0227	0.0211	0.0235	0.0233	0.0254	0.0247
	f:	0.0414	0.0382	0.0324	0.0281	0.0349	0.0343	0.0408	0.0384
	S [mca/km]:	2.4994	2.3086	1.9571	1.6959	2.1091	2.0724	2.4632	2.3187
(e)	n:	0.0287	0.0316	0.0301	0.0264	0.0312	0.0278	0.0282	0.0250
	f:	0.0510	0.0619	0.0559	0.0430	0.0604	0.0477	0.0493	0.0387
	S [mca/km]:	2.2214	2.6972	2.4350	1.8729	2.6312	2.0793	2.1466	1.6871
(f)	n:	0.0227	0.0242	0.0161	0.0209	0.0167	0.0200	0.0258	0.0247
	f:	0.0326	0.0370	0.0165	0.0277	0.0176	0.0253	0.0420	0.0384
	S [mca/km]:	2.0197	2.2882	1.0184	1.7160	1.0917	1.5684	2.5969	2.3788
(g)	n:	0.0260	0.0272	0.0222	0.0230	0.0232	0.0231	0.0285	0.0247
	f:	0.0414	0.0454	0.0304	0.0325	0.0331	0.0328	0.0499	0.0374
	S [mca/km]:	1.5865	1.7402	1.1655	1.2456	1.2668	1.2579	1.9122	1.4313
(h)	n:	0.0309	0.0309	0.0366	0.0263	0.0380	0.0320	0.0302	0.0250
	f:	0.0597	0.0597	0.0839	0.0432	0.0903	0.0642	0.0570	0.0391
	S [mca/km]:	3.1554	3.1552	4.4344	2.2830	4.7734	3.3933	3.0163	2.0655
(i)	n:	0.0308	0.0354	0.0377	0.0286	0.0390	0.0328	0.0298	0.0249
	f:	0.0592	0.0781	0.0890	0.0512	0.0952	0.0671	0.0556	0.0387
	S [mca/km]:	2.9664	3.9122	4.4562	2.5632	4.7685	3.3588	2.7845	1.9399
(j)	n:	0.0282	0.0337	0.0314	0.0270	0.0326	0.0286	0.0291	0.0247
	f:	0.0494	0.0706	0.0612	0.0453	0.0660	0.0508	0.0526	0.0380
	S [mca/km]:	2.3145	3.3035	2.8658	2.1193	3.0889	2.3761	2.4600	1.7767

QUADRO A2.3 – FRENTE 02 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “PAVLOVSKII”

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0256	0.0266	0.0205	0.0227	0.0214	0.0225	0.0292	0.0255
	f:	0.0404	0.0436	0.0258	0.0317	0.0282	0.0312	0.0525	0.0399
	S [mca/km]:	1.5859	1.7107	1.0120	1.2429	1.1050	1.2222	2.0607	1.5661
(b)	n:	0.0219	0.0222	0.0141	0.0199	0.0146	0.0194	0.0259	0.0254
	f:	0.0301	0.0310	0.0125	0.0249	0.0133	0.0237	0.0423	0.0404
	S [mca/km]:	1.7235	1.7725	0.7130	1.4228	0.7625	1.3552	2.4188	2.3113
(c)	n:	0.0268	0.0280	0.0223	0.0241	0.0233	0.0235	0.0293	0.0253
	f:	0.0441	0.0484	0.0306	0.0356	0.0334	0.0339	0.0528	0.0392
	S [mca/km]:	1.7238	1.8919	1.1964	1.3930	1.3074	1.3247	2.0666	1.5336
(d)	n:	0.0264	0.0253	0.0232	0.0215	0.0241	0.0239	0.0262	0.0254
	f:	0.0440	0.0404	0.0339	0.0291	0.0367	0.0360	0.0433	0.0406
	S [mca/km]:	2.6573	2.4402	2.0441	1.7538	2.2147	2.1734	2.6160	2.4516
(e)	n:	0.0299	0.0332	0.0314	0.0273	0.0327	0.0288	0.0293	0.0258
	f:	0.0553	0.0681	0.0610	0.0460	0.0663	0.0515	0.0533	0.0411
	S [mca/km]:	2.4082	2.9672	2.6582	2.0040	2.8891	2.2427	2.3210	1.7908
(f)	n:	0.0232	0.0248	0.0162	0.0213	0.0168	0.0203	0.0266	0.0254
	f:	0.0341	0.0390	0.0165	0.0286	0.0178	0.0260	0.0446	0.0406
	S [mca/km]:	2.1101	2.4123	1.0231	1.7728	1.0997	1.6108	2.7632	2.5149
(g)	n:	0.0269	0.0282	0.0227	0.0236	0.0238	0.0237	0.0297	0.0254
	f:	0.0444	0.0490	0.0318	0.0342	0.0348	0.0345	0.0543	0.0397
	S [mca/km]:	1.6993	1.8779	1.2181	1.3085	1.3326	1.3225	2.0793	1.5204
(h)	n:	0.0322	0.0322	0.0387	0.0271	0.0402	0.0335	0.0315	0.0257
	f:	0.0651	0.0651	0.0936	0.0460	0.1012	0.0703	0.0620	0.0413
	S [mca/km]:	3.4410	3.4408	4.9498	2.4325	5.3540	3.7194	3.2788	2.1849
(i)	n:	0.0322	0.0373	0.0400	0.0297	0.0415	0.0344	0.0311	0.0256
	f:	0.0647	0.0870	0.1000	0.0553	0.1075	0.0739	0.0605	0.0410
	S [mca/km]:	3.2405	4.3582	5.0082	2.7703	5.3833	3.7021	3.0278	2.0539
(j)	n:	0.0293	0.0355	0.0329	0.0280	0.0343	0.0297	0.0303	0.0254
	f:	0.0535	0.0785	0.0674	0.0487	0.0731	0.0551	0.0572	0.0403
	S [mca/km]:	2.5063	3.6757	3.1548	2.2792	3.4197	2.5783	2.6765	1.8846

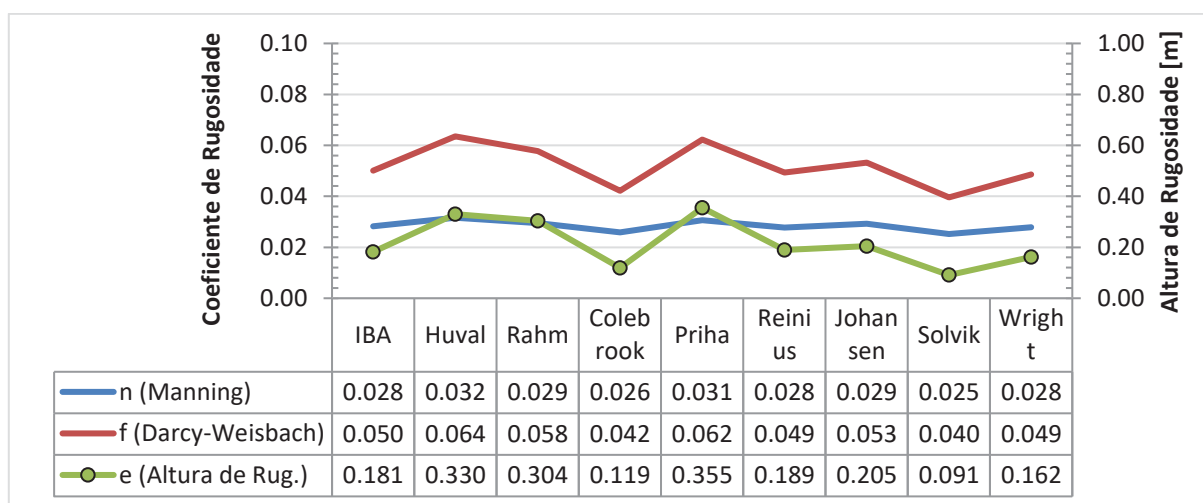
QUADRO A2.4 – FRENTE 02 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0253	0.0262	0.0203	0.0225	0.0212	0.0223	0.0287	0.0251
	f:	0.0393	0.0423	0.0254	0.0310	0.0277	0.0305	0.0507	0.0388
	S [mca/km]:	1.5426	1.6601	0.9981	1.2182	1.0870	1.1986	1.9883	1.5239
(b)	n:	0.0217	0.0220	0.0141	0.0198	0.0146	0.0193	0.0256	0.0250
	f:	0.0296	0.0305	0.0125	0.0246	0.0133	0.0235	0.0412	0.0394
	S [mca/km]:	1.6950	1.7418	0.7130	1.4067	0.7624	1.3416	2.3555	2.2538
(c)	n:	0.0264	0.0276	0.0221	0.0238	0.0231	0.0232	0.0288	0.0249
	f:	0.0427	0.0468	0.0300	0.0348	0.0327	0.0331	0.0510	0.0382
	S [mca/km]:	1.6715	1.8291	1.1737	1.3599	1.2789	1.2953	1.9926	1.4926
(d)	n:	0.0260	0.0250	0.0229	0.0213	0.0238	0.0236	0.0258	0.0250
	f:	0.0428	0.0394	0.0332	0.0286	0.0359	0.0352	0.0422	0.0396
	S [mca/km]:	2.5837	2.3786	2.0030	1.7262	2.1650	2.1258	2.5447	2.3894
(e)	n:	0.0293	0.0325	0.0308	0.0268	0.0321	0.0283	0.0288	0.0254
	f:	0.0533	0.0653	0.0587	0.0446	0.0636	0.0497	0.0514	0.0400
	S [mca/km]:	2.3222	2.8442	2.5560	1.9430	2.7715	2.1671	2.2406	1.7423
(f)	n:	0.0230	0.0245	0.0162	0.0211	0.0167	0.0202	0.0262	0.0250
	f:	0.0334	0.0380	0.0165	0.0282	0.0177	0.0257	0.0434	0.0396
	S [mca/km]:	2.0674	2.3541	1.0208	1.7457	1.0958	1.5905	2.6857	2.4512
(g)	n:	0.0264	0.0278	0.0225	0.0233	0.0235	0.0234	0.0292	0.0251
	f:	0.0430	0.0473	0.0311	0.0334	0.0340	0.0337	0.0523	0.0386
	S [mca/km]:	1.6467	1.8140	1.1931	1.2787	1.3015	1.2919	2.0021	1.4785
(h)	n:	0.0316	0.0316	0.0378	0.0267	0.0392	0.0329	0.0309	0.0254
	f:	0.0626	0.0626	0.0892	0.0447	0.0964	0.0675	0.0597	0.0403
	S [mca/km]:	3.3108	3.3106	4.7195	2.3630	5.0955	3.5714	3.1589	2.1291
(i)	n:	0.0315	0.0364	0.0390	0.0292	0.0404	0.0337	0.0305	0.0253
	f:	0.0622	0.0830	0.0951	0.0534	0.1020	0.0708	0.0582	0.0399
	S [mca/km]:	3.1155	4.1579	4.7621	2.6750	5.1102	3.5466	2.9164	2.0006
(j)	n:	0.0288	0.0347	0.0322	0.0275	0.0335	0.0292	0.0297	0.0251
	f:	0.0517	0.0749	0.0646	0.0471	0.0699	0.0531	0.0551	0.0392
	S [mca/km]:	2.4177	3.5073	3.0230	2.2050	3.2695	2.4851	2.5769	1.8340

QUADRO A2.5 – FRENTE 02 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

	Média "Elfman"	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0403	0.0434	0.0257	0.0316	0.0281	0.0311	0.0523	0.0398
	S [mca/km]:	1.5799	1.7036	1.0102	1.2396	1.1027	1.2191	2.0502	1.5603
(b)	f:	0.0301	0.0309	0.0125	0.0249	0.0133	0.0237	0.0422	0.0403
	S [mca/km]:	1.7198	1.7685	0.7130	1.4208	0.7625	1.3535	2.4100	2.3034
(c)	f:	0.0439	0.0481	0.0305	0.0355	0.0333	0.0338	0.0526	0.0391
	S [mca/km]:	1.7164	1.8828	1.1935	1.3885	1.3036	1.3208	2.0557	1.5279
(d)	f:	0.0439	0.0403	0.0338	0.0290	0.0366	0.0359	0.0432	0.0405
	S [mca/km]:	2.6470	2.4317	2.0386	1.7502	2.2080	2.1670	2.6060	2.4430
(e)	f:	0.0550	0.0676	0.0606	0.0458	0.0659	0.0512	0.0530	0.0409
	S [mca/km]:	2.3951	2.9478	2.6425	1.9950	2.8707	2.2314	2.3089	1.7838
(f)	f:	0.0340	0.0388	0.0165	0.0286	0.0178	0.0260	0.0445	0.0405
	S [mca/km]:	2.1044	2.4043	1.0229	1.7693	1.0992	1.6082	2.7523	2.5061
(g)	f:	0.0442	0.0488	0.0317	0.0341	0.0347	0.0344	0.0540	0.0395
	S [mca/km]:	1.6918	1.8687	1.2148	1.3045	1.3284	1.3184	2.0679	1.5146
(h)	f:	0.0647	0.0647	0.0929	0.0458	0.1004	0.0699	0.0616	0.0412
	S [mca/km]:	3.4201	3.4198	4.9105	2.4218	5.3093	3.6953	3.2597	2.1764
(i)	f:	0.0643	0.0864	0.0992	0.0550	0.1066	0.0734	0.0601	0.0409
	S [mca/km]:	3.2207	4.3249	4.9661	2.7556	5.3360	3.6769	3.0104	2.0460
(j)	f:	0.0533	0.0780	0.0670	0.0485	0.0726	0.0548	0.0569	0.0401
	S [mca/km]:	2.4931	3.6486	3.1343	2.2684	3.3960	2.5643	2.6615	1.8775

FIGURA A2.1 – FRENTE 02 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



2.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A2.6 – FRENTE 02 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 02	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	TOTAL
L _{fr} [km]:	0.303	0.038	0.093	0.170	0.114	0.147	0.064	0.121	0.429	0.765	2.243
h _{f_loc} [m]:	0.002	0.006	0.009	0.008	0.007	0.005	0.015	0.004	0.000	0.000	0.056

QUADRO A2.7 – FRENTE 02 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.453	0.485	0.298	0.361	0.323	0.355	0.577	0.447
(b)	0.063	0.065	0.027	0.053	0.029	0.050	0.087	0.083
(c)	0.150	0.163	0.107	0.123	0.116	0.117	0.177	0.135
(d)	0.425	0.392	0.333	0.288	0.359	0.352	0.419	0.394
(e)	0.253	0.307	0.278	0.214	0.300	0.237	0.245	0.192
(f)	0.297	0.336	0.150	0.252	0.160	0.231	0.382	0.350
(g)	0.102	0.111	0.075	0.080	0.081	0.081	0.122	0.092
(h)	0.380	0.380	0.534	0.275	0.575	0.409	0.363	0.249
(i)	1.271	1.676	1.909	1.098	2.043	1.439	1.193	0.831
(j)	1.769	2.526	2.191	1.620	2.361	1.817	1.881	1.358
SUB-TOTAL [m]:	5.219	6.500	5.957	4.420	6.405	5.144	5.502	4.187

QUADRO A2.8 – FRENTE 02 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.481	0.518	0.307	0.377	0.335	0.370	0.624	0.475
(b)	0.065	0.067	0.027	0.054	0.029	0.051	0.092	0.088
(c)	0.160	0.176	0.111	0.130	0.122	0.123	0.192	0.143
(d)	0.452	0.415	0.347	0.298	0.377	0.369	0.445	0.417
(e)	0.275	0.338	0.303	0.228	0.329	0.256	0.265	0.204
(f)	0.310	0.355	0.150	0.261	0.162	0.237	0.406	0.370
(g)	0.109	0.120	0.078	0.084	0.085	0.085	0.133	0.097
(h)	0.415	0.415	0.596	0.293	0.645	0.448	0.395	0.263
(i)	1.389	1.868	2.146	1.187	2.307	1.586	1.297	0.880
(j)	1.916	2.810	2.412	1.742	2.614	1.971	2.046	1.441
SUB-TOTAL [m]:	5.627	7.138	6.534	4.710	7.061	5.553	5.952	4.433

QUADRO A2.9 – FRENTE 02 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.467	0.503	0.302	0.369	0.329	0.363	0.602	0.462
(b)	0.064	0.066	0.027	0.053	0.029	0.051	0.090	0.086
(c)	0.155	0.170	0.109	0.126	0.119	0.120	0.185	0.139
(d)	0.439	0.404	0.341	0.293	0.368	0.361	0.433	0.406
(e)	0.265	0.324	0.291	0.222	0.316	0.247	0.255	0.199
(f)	0.304	0.346	0.150	0.257	0.161	0.234	0.395	0.360
(g)	0.105	0.116	0.076	0.082	0.083	0.083	0.128	0.095
(h)	0.399	0.399	0.569	0.285	0.614	0.430	0.381	0.257
(i)	1.335	1.782	2.041	1.146	2.190	1.520	1.250	0.857
(j)	1.848	2.681	2.311	1.686	2.500	1.900	1.970	1.402
SUB-TOTAL [m]:	5.439	6.848	6.273	4.575	6.765	5.366	5.745	4.318

QUADRO A2.10 – FRENTE 02 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.479	0.516	0.306	0.376	0.334	0.369	0.621	0.473
(b)	0.065	0.067	0.027	0.054	0.029	0.051	0.092	0.088
(c)	0.160	0.175	0.111	0.129	0.121	0.123	0.191	0.142
(d)	0.450	0.413	0.347	0.298	0.375	0.368	0.443	0.415
(e)	0.273	0.336	0.301	0.227	0.327	0.254	0.263	0.203
(f)	0.309	0.353	0.150	0.260	0.162	0.236	0.405	0.368
(g)	0.108	0.120	0.078	0.083	0.085	0.084	0.132	0.097
(h)	0.412	0.412	0.592	0.292	0.640	0.445	0.393	0.262
(i)	1.380	1.853	2.128	1.181	2.286	1.576	1.290	0.877
(j)	1.906	2.789	2.396	1.734	2.596	1.960	2.035	1.435
SUB-TOTAL [m]:	5.599	7.092	6.492	4.690	7.012	5.525	5.921	4.417

FIGURA A2.2 – FRENTE 02 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

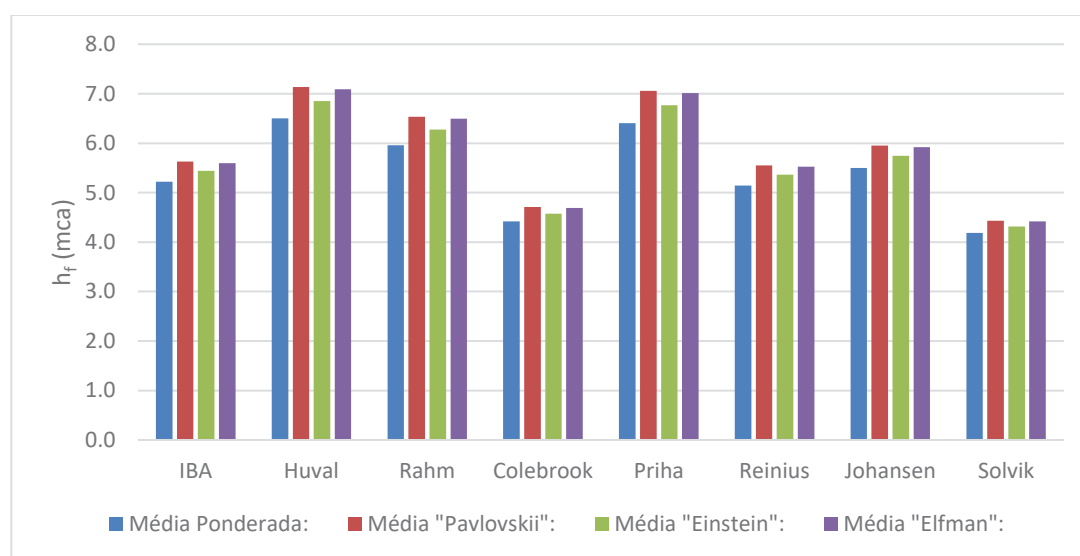
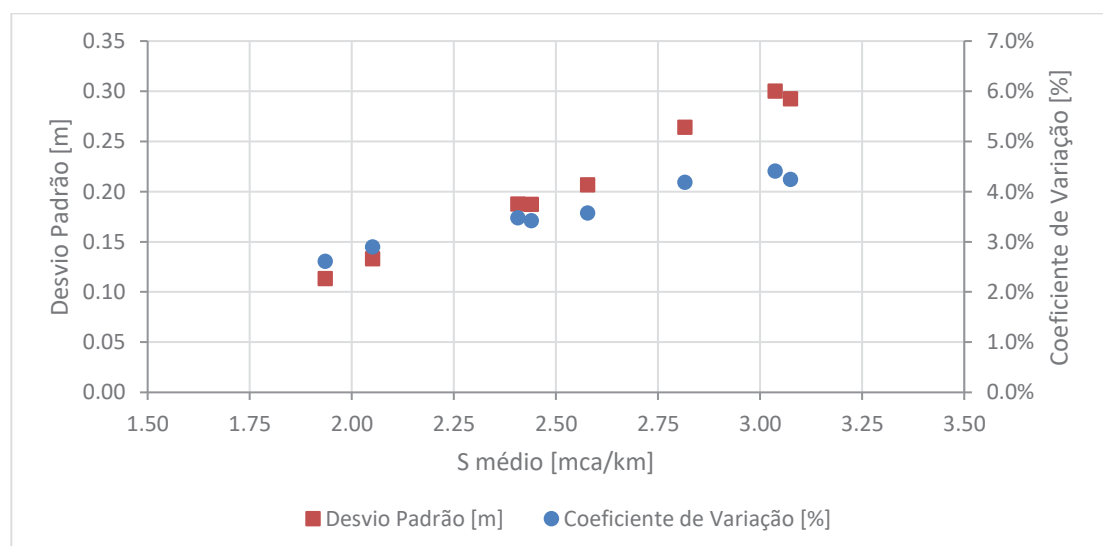


FIGURA A2.3 – FRENTE 02 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



3 FRENTE 03

3.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A3.1 – FRENTE 03 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)
V _{med} [m/s]:		2.7095	3.4096	2.8253	3.4746	2.7652	3.3130	2.6036	3.1031	2.5852	2.9381	2.5747	2.8872	2.5449
Re:		2.17E+07	2.47E+07	2.22E+07	2.49E+07	2.20E+07	2.43E+07	2.13E+07	2.35E+07	2.13E+07	2.28E+07	2.12E+07	2.26E+07	2.11E+07
IBA	rms _p [m]:	0.2327	0.0567	0.2040	0.1041	0.2256	0.2262	0.2274	0.0648	0.1795	0.2459	0.1767	0.2233	0.1452
	rms _a [m]:	0.0828	0.0191	0.0856	0.0486	0.0850	0.1494	0.1201	0.0187	0.0785	0.1569	0.0816	0.1547	0.0535
	ε [m]:	0.3156	0.0758	0.2896	0.1527	0.3106	0.3756	0.3475	0.0835	0.2580	0.4028	0.2583	0.3780	0.1987
	f:	0.0644	0.0386	0.0626	0.0500	0.0641	0.0725	0.0665	0.0393	0.0584	0.0730	0.0583	0.0705	0.0523
HUVAL	A _n [m²]:	50.10	42.68	48.55	40.79	47.19	40.61	46.51	47.20	48.44	46.96	48.39	47.83	53.65
	A _m [m²]:	55.36	43.99	53.09	43.17	54.24	45.28	57.61	48.34	58.02	51.05	58.26	51.95	58.94
	ε [m]:	0.4086	0.1130	0.3598	0.2071	0.5590	0.4018	0.8692	0.0930	0.7421	0.3299	0.7630	0.3298	0.3980
	f:	0.0724	0.0444	0.0689	0.0564	0.0845	0.0749	0.1053	0.0408	0.0963	0.0666	0.0976	0.0663	0.0703
RAHM	A _{1%} [m²]:	50.68	42.66	48.71	40.70	47.59	40.78	47.00	47.22	49.57	46.99	48.76	47.81	55.02
	A _{99%} [m²]:	62.63	45.00	58.19	46.65	60.39	53.48	63.96	49.86	62.43	62.04	62.68	60.95	61.91
	δ [%]:	23.58	5.49	19.48	14.63	26.90	31.14	36.08	5.60	25.94	32.03	28.53	27.48	12.52
	ε [m]:	0.3283	0.0023	0.2045	0.0868	0.4353	0.5398	0.7977	0.0027	0.4161	0.6042	0.5099	0.4479	0.0634
COLEBROOK	f:	0.0655	0.0152	0.0541	0.0406	0.0748	0.0866	0.1004	0.0155	0.0721	0.0891	0.0793	0.0764	0.0347
	D _{h,med} [m]:	8.0103	7.2489	7.8432	7.1541	7.9613	7.3283	8.1924	7.5614	8.2264	7.7617	8.2501	7.8333	8.3097
	D _{h,1%} [m]:	7.7213	7.1180	7.5859	6.9928	7.4455	6.9945	7.4760	7.5235	7.6760	7.4872	7.6293	7.5614	8.0722
	t _m [m]:	0.1445	0.0655	0.1286	0.0806	0.2579	0.1669	0.3582	0.0189	0.2752	0.1373	0.3104	0.1360	0.1188
PRIHA	ε [m]:	0.1445	0.0655	0.1286	0.0806	0.2579	0.1669	0.3582	0.0189	0.2752	0.1373	0.3104	0.1360	0.1188
	f:	0.0469	0.0367	0.0452	0.0396	0.0592	0.0513	0.0674	0.0249	0.0600	0.0465	0.0631	0.0462	0.0430
	A _{1%} [m²]:	50.68	42.66	48.71	40.70	47.59	40.78	47.00	47.22	49.57	46.99	48.76	47.81	55.02
	δ [%]:	23.58	5.49	19.48	14.63	26.90	31.14	36.08	5.60	25.94	32.03	28.53	27.48	12.52
REINI	f:	0.0717	0.0165	0.0591	0.0437	0.0814	0.0930	0.1091	0.0169	0.0787	0.0968	0.0865	0.0832	0.0383
	δ [%]:	23.58	5.49	19.48	14.63	26.90	31.14	36.08	5.60	25.94	32.03	28.53	27.48	12.52
	f _{int} :	0.0500	0.0347	0.0466	0.0424	0.0529	0.0565	0.0607	0.0348	0.0520	0.0572	0.0543	0.0534	0.0406

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)
WRIGHT	f_{sup} :	0.0737	0.0248	0.0626	0.0495	0.0826	0.0941	0.1074	0.0251	0.0800	0.0965	0.0870	0.0842	0.0438
	f:	0.0577	0.0288	0.0512	0.0434	0.0630	0.0698	0.0777	0.0290	0.0615	0.0712	0.0656	0.0640	0.0400
	t_n [m]:	0.1679	0.0555	0.1742	0.1125	0.2508	0.1083	0.4127	0.0450	0.3156	0.0810	0.3621	0.0557	0.1359
	$R_{50\%}$ [m]:	2.0014	1.8139	1.9592	1.7897	1.9901	1.7984	2.0535	1.8915	2.0597	1.9063	2.0670	1.9161	2.0758
	$t_n/R_{50\%}$:	0.0839	0.0306	0.0889	0.0628	0.1260	0.0602	0.2010	0.0238	0.1532	0.0425	0.1752	0.0291	0.0655
JOHANNES	ϵ [m]:	0.4045	0.4964	0.3074	0.5469	0.3604	0.4515	0.3229	0.2492	0.3052	0.3059	0.3212	0.3205	0.3349
	f:	0.0720	0.0834	0.0642	0.0882	0.0685	0.0792	0.0644	0.0596	0.0627	0.0644	0.0640	0.0654	0.0650
	ϵ_a [m]:	0.0194	0.0104	0.0163	0.0149	0.0175	0.0163	0.0158	0.0109	0.0174	0.0169	0.0195	0.0181	0.0167
SOLVİK	ϵ [m]:	0.1694	0.1604	0.1663	0.1649	0.1675	0.1663	0.1658	0.1609	0.1674	0.1669	0.1695	0.1681	0.1667
	f:	0.0498	0.0507	0.0498	0.0515	0.0497	0.0512	0.0490	0.0499	0.0491	0.0501	0.0492	0.0501	0.0488

3.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A3.2 – FRENTE 03 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0276	0.0291	0.0278	0.0241	0.0289	0.0263	0.0290	0.0247
	f:	0.0475	0.0526	0.0482	0.0361	0.0521	0.0432	0.0523	0.0380
	S [mca/km]:	2.2167	2.4553	2.2507	1.6872	2.4354	2.0170	2.4450	1.7768
(b)	n:	0.0220	0.0234	0.0151	0.0216	0.0155	0.0195	0.0308	0.0248
	f:	0.0312	0.0352	0.0146	0.0300	0.0156	0.0244	0.0612	0.0395
	S [mca/km]:	2.5531	2.8784	1.1968	2.4483	1.2718	1.9973	5.0007	3.2261
(c)	n:	0.0272	0.0283	0.0255	0.0236	0.0265	0.0249	0.0275	0.0246
	f:	0.0463	0.0504	0.0408	0.0351	0.0440	0.0389	0.0474	0.0381
	S [mca/km]:	2.4017	2.6123	2.1182	1.8184	2.2847	2.0197	2.4567	1.9751
(d)	n:	0.0246	0.0259	0.0225	0.0222	0.0232	0.0231	0.0316	0.0249
	f:	0.0391	0.0435	0.0327	0.0320	0.0348	0.0346	0.0645	0.0401
	S [mca/km]:	3.3639	3.7394	2.8134	2.7527	2.9957	2.9793	5.5521	3.4526
(e)	n:	0.0277	0.0313	0.0296	0.0267	0.0308	0.0275	0.0285	0.0248
	f:	0.0479	0.0611	0.0548	0.0446	0.0591	0.0472	0.0507	0.0384
	S [mca/km]:	2.3431	2.9901	2.6829	2.1850	2.8927	2.3095	2.4835	1.8791
(f)	n:	0.0290	0.0294	0.0314	0.0249	0.0324	0.0285	0.0302	0.0249
	f:	0.0540	0.0556	0.0633	0.0399	0.0675	0.0523	0.0584	0.0398
	S [mca/km]:	4.1259	4.2438	4.8302	3.0441	5.1496	3.9894	4.4608	3.0407
(g)	n:	0.0281	0.0344	0.0337	0.0282	0.0349	0.0301	0.0277	0.0246
	f:	0.0487	0.0731	0.0701	0.0493	0.0755	0.0559	0.0474	0.0374
	S [mca/km]:	2.0554	3.0833	2.9545	2.0799	3.1823	2.3555	1.9979	1.5783
(h)	n:	0.0223	0.0226	0.0153	0.0184	0.0158	0.0196	0.0266	0.0247
	f:	0.0315	0.0325	0.0148	0.0216	0.0159	0.0244	0.0450	0.0386
	S [mca/km]:	2.0419	2.1075	0.9626	1.4011	1.0294	1.5833	2.9188	2.5041
(i)	n:	0.0265	0.0331	0.0291	0.0269	0.0302	0.0272	0.0274	0.0246
	f:	0.0435	0.0675	0.0522	0.0445	0.0565	0.0455	0.0463	0.0375
	S [mca/km]:	1.8004	2.7930	2.1632	1.8432	2.3376	1.8838	1.9156	1.5513
(j)	n:	0.0292	0.0280	0.0319	0.0240	0.0331	0.0289	0.0276	0.0248
	f:	0.0535	0.0494	0.0639	0.0362	0.0688	0.0524	0.0480	0.0386
	S [mca/km]:	3.0335	2.7994	3.6203	2.0530	3.9003	2.9711	2.7187	2.1884
(k)	n:	0.0265	0.0332	0.0303	0.0274	0.0315	0.0279	0.0276	0.0247
	f:	0.0433	0.0681	0.0567	0.0464	0.0612	0.0480	0.0470	0.0375
	S [mca/km]:	1.7753	2.7873	2.3202	1.8999	2.5047	1.9667	1.9246	1.5358
(l)	n:	0.0287	0.0279	0.0297	0.0239	0.0309	0.0275	0.0278	0.0248
	f:	0.0517	0.0490	0.0555	0.0359	0.0598	0.0475	0.0484	0.0384
	S [mca/km]:	2.8046	2.6566	3.0083	1.9454	3.2438	2.5753	2.6272	2.0843
(m)	n:	0.0254	0.0289	0.0214	0.0234	0.0223	0.0227	0.0279	0.0247
	f:	0.0396	0.0512	0.0281	0.0336	0.0305	0.0316	0.0479	0.0374
	S [mca/km]:	1.5744	2.0357	1.1150	1.3341	1.2099	1.2556	1.9020	1.4848

QUADRO A3.3 – FRENTE 03 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “PAVLOVSKII”

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0287	0.0303	0.0289	0.0248	0.0302	0.0273	0.0302	0.0255
	f:	0.0512	0.0572	0.0521	0.0382	0.0567	0.0463	0.0570	0.0404
	S [mca/km]:	2.3937	2.6726	2.4334	1.7833	2.6494	2.1620	2.6606	1.8857
(b)	n:	0.0225	0.0240	0.0151	0.0220	0.0156	0.0197	0.0322	0.0255
	f:	0.0325	0.0369	0.0147	0.0311	0.0156	0.0250	0.0667	0.0417
	S [mca/km]:	2.6551	3.0185	1.1983	2.5389	1.2751	2.0442	5.4558	3.4108
(c)	n:	0.0282	0.0295	0.0264	0.0243	0.0275	0.0257	0.0286	0.0254
	f:	0.0499	0.0546	0.0436	0.0370	0.0473	0.0414	0.0511	0.0404
	S [mca/km]:	2.5881	2.8337	2.2601	1.9171	2.4523	2.1469	2.6521	2.0959
(d)	n:	0.0253	0.0267	0.0230	0.0227	0.0237	0.0237	0.0330	0.0256
	f:	0.0413	0.0462	0.0341	0.0333	0.0365	0.0363	0.0706	0.0425
	S [mca/km]:	3.5511	3.9773	2.9331	2.8655	3.1368	3.1184	6.0725	3.6515
(e)	n:	0.0287	0.0328	0.0309	0.0277	0.0322	0.0285	0.0297	0.0255
	f:	0.0515	0.0670	0.0596	0.0478	0.0646	0.0507	0.0549	0.0406
	S [mca/km]:	2.5224	3.2778	2.9176	2.3400	3.1633	2.4836	2.6852	1.9898
(f)	n:	0.0302	0.0306	0.0328	0.0256	0.0340	0.0296	0.0315	0.0256
	f:	0.0584	0.0602	0.0692	0.0422	0.0741	0.0564	0.0635	0.0421
	S [mca/km]:	4.4617	4.5984	5.2819	3.2207	5.6562	4.3038	4.8507	3.2169
(g)	n:	0.0292	0.0364	0.0355	0.0294	0.0370	0.0315	0.0288	0.0253
	f:	0.0528	0.0817	0.0780	0.0535	0.0845	0.0611	0.0512	0.0397
	S [mca/km]:	2.2259	3.4449	3.2904	2.2546	3.5638	2.5783	2.1588	1.6740
(h)	n:	0.0227	0.0231	0.0153	0.0186	0.0158	0.0198	0.0275	0.0254
	f:	0.0328	0.0339	0.0149	0.0220	0.0159	0.0250	0.0482	0.0408
	S [mca/km]:	2.1293	2.2027	0.9643	1.4255	1.0330	1.6227	3.1254	2.6507
(i)	n:	0.0275	0.0348	0.0304	0.0279	0.0317	0.0282	0.0284	0.0254
	f:	0.0467	0.0749	0.0569	0.0479	0.0619	0.0490	0.0499	0.0397
	S [mca/km]:	1.9326	3.1026	2.3560	1.9823	2.5615	2.0295	2.0664	1.6457
(j)	n:	0.0304	0.0291	0.0334	0.0246	0.0348	0.0301	0.0287	0.0255
	f:	0.0581	0.0533	0.0703	0.0382	0.0761	0.0568	0.0517	0.0409
	S [mca/km]:	3.2948	3.0221	3.9841	2.1650	4.3156	3.2220	2.9285	2.3189
(k)	n:	0.0275	0.0350	0.0318	0.0285	0.0331	0.0290	0.0287	0.0254
	f:	0.0466	0.0757	0.0622	0.0501	0.0675	0.0520	0.0508	0.0398
	S [mca/km]:	1.9067	3.1017	2.5455	2.0515	2.7644	2.1296	2.0804	1.6305
(l)	n:	0.0299	0.0290	0.0311	0.0246	0.0323	0.0286	0.0289	0.0255
	f:	0.0561	0.0529	0.0605	0.0378	0.0656	0.0512	0.0523	0.0408
	S [mca/km]:	3.0428	2.8703	3.2813	2.0522	3.5584	2.7757	2.8361	2.2103
(m)	n:	0.0262	0.0301	0.0218	0.0240	0.0227	0.0232	0.0290	0.0254
	f:	0.0422	0.0557	0.0291	0.0353	0.0318	0.0331	0.0518	0.0396
	S [mca/km]:	1.6767	2.2120	1.1567	1.4027	1.2627	1.3140	2.0558	1.5741

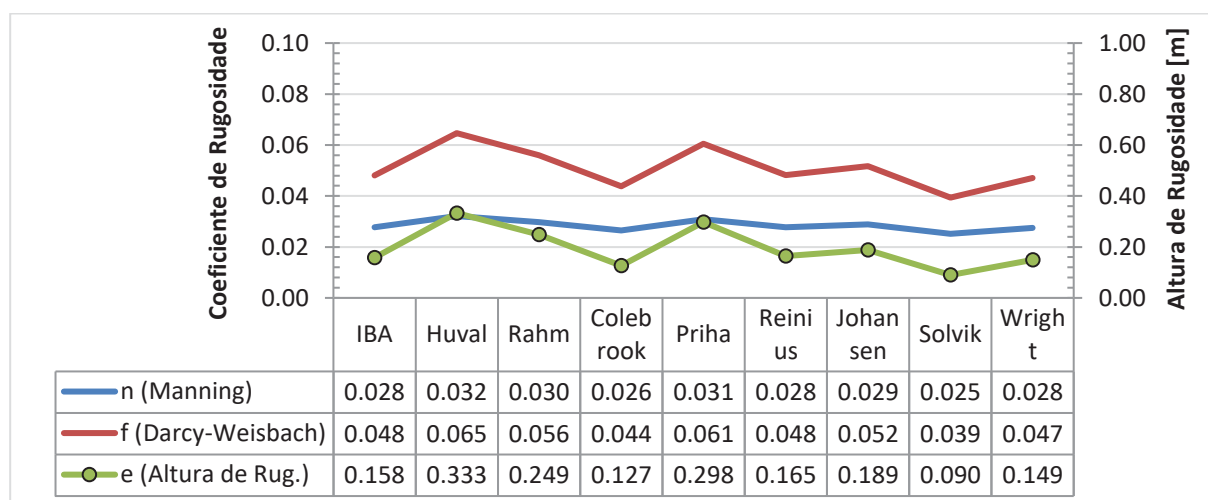
QUADRO A3.4 – FRENTE 03 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0282	0.0297	0.0284	0.0244	0.0296	0.0268	0.0297	0.0251
	f:	0.0495	0.0551	0.0503	0.0372	0.0546	0.0448	0.0548	0.0393
	S [mca/km]:	2.3117	2.5726	2.3489	1.7381	2.5509	2.0945	2.5614	1.8346
(b)	n:	0.0223	0.0237	0.0151	0.0218	0.0156	0.0196	0.0316	0.0251
	f:	0.0319	0.0361	0.0147	0.0305	0.0156	0.0247	0.0642	0.0407
	S [mca/km]:	2.6068	2.9526	1.1975	2.4958	1.2735	2.0217	5.2485	3.3245
(c)	n:	0.0277	0.0290	0.0260	0.0240	0.0270	0.0253	0.0281	0.0250
	f:	0.0482	0.0527	0.0423	0.0361	0.0458	0.0402	0.0494	0.0393
	S [mca/km]:	2.5017	2.7315	2.1938	1.8706	2.3743	2.0873	2.5616	2.0392
(d)	n:	0.0250	0.0264	0.0227	0.0225	0.0235	0.0234	0.0324	0.0253
	f:	0.0403	0.0450	0.0334	0.0327	0.0357	0.0355	0.0679	0.0414
	S [mca/km]:	3.4635	3.8668	2.8765	2.8121	3.0704	3.0529	5.8363	3.5586
(e)	n:	0.0283	0.0321	0.0303	0.0273	0.0315	0.0281	0.0291	0.0252
	f:	0.0498	0.0643	0.0574	0.0463	0.0621	0.0491	0.0530	0.0396
	S [mca/km]:	2.4396	3.1467	2.8100	2.2681	3.0398	2.4031	2.5923	1.9380
(f)	n:	0.0297	0.0301	0.0322	0.0253	0.0333	0.0291	0.0309	0.0253
	f:	0.0564	0.0581	0.0665	0.0411	0.0711	0.0545	0.0612	0.0411
	S [mca/km]:	4.3077	4.4360	5.0766	3.1382	5.4268	4.1593	4.6727	3.1346
(g)	n:	0.0287	0.0355	0.0347	0.0289	0.0361	0.0308	0.0283	0.0250
	f:	0.0509	0.0778	0.0744	0.0515	0.0804	0.0587	0.0494	0.0386
	S [mca/km]:	2.1471	3.2816	3.1383	2.1739	3.3918	2.4761	2.0843	1.6291
(h)	n:	0.0225	0.0229	0.0153	0.0185	0.0158	0.0197	0.0271	0.0250
	f:	0.0322	0.0332	0.0148	0.0218	0.0159	0.0247	0.0467	0.0398
	S [mca/km]:	2.0879	2.1577	0.9635	1.4137	1.0313	1.6037	3.0295	2.5821
(i)	n:	0.0271	0.0340	0.0298	0.0274	0.0310	0.0277	0.0280	0.0250
	f:	0.0452	0.0715	0.0548	0.0463	0.0594	0.0474	0.0482	0.0387
	S [mca/km]:	1.8711	2.9622	2.2672	1.9176	2.4589	1.9619	1.9965	1.6014
(j)	n:	0.0298	0.0286	0.0327	0.0243	0.0340	0.0295	0.0282	0.0252
	f:	0.0560	0.0515	0.0674	0.0373	0.0728	0.0548	0.0500	0.0398
	S [mca/km]:	3.1748	2.9193	3.8187	2.1123	4.1276	3.1066	2.8315	2.2578
(k)	n:	0.0270	0.0342	0.0311	0.0280	0.0324	0.0285	0.0282	0.0251
	f:	0.0451	0.0723	0.0596	0.0484	0.0646	0.0502	0.0490	0.0387
	S [mca/km]:	1.8456	2.9591	2.4422	1.9812	2.6459	2.0543	2.0082	1.5861
(l)	n:	0.0294	0.0285	0.0305	0.0243	0.0317	0.0281	0.0284	0.0251
	f:	0.0541	0.0511	0.0582	0.0369	0.0630	0.0495	0.0505	0.0397
	S [mca/km]:	2.9331	2.7716	3.1561	2.0019	3.4148	2.6830	2.7396	2.1513
(m)	n:	0.0258	0.0295	0.0216	0.0237	0.0225	0.0229	0.0285	0.0250
	f:	0.0410	0.0536	0.0286	0.0345	0.0312	0.0324	0.0500	0.0386
	S [mca/km]:	1.6289	2.1308	1.1368	1.3703	1.2377	1.2863	1.9847	1.5322

QUADRO A3.5 – FRENTE 03 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

	Média "Elfman"	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0510	0.0569	0.0518	0.0380	0.0564	0.0461	0.0566	0.0402
	S [mca/km]:	2.3816	2.6576	2.4209	1.7770	2.6346	2.1523	2.6457	1.8785
(b)	f:	0.0324	0.0368	0.0147	0.0310	0.0156	0.0250	0.0664	0.0416
	S [mca/km]:	2.6487	3.0096	1.1982	2.5332	1.2749	2.0414	5.4240	3.3988
(c)	f:	0.0496	0.0543	0.0434	0.0368	0.0471	0.0412	0.0509	0.0402
	S [mca/km]:	2.5754	2.8184	2.2506	1.9107	2.4409	2.1385	2.6387	2.0879
(d)	f:	0.0411	0.0461	0.0340	0.0332	0.0364	0.0361	0.0702	0.0423
	S [mca/km]:	3.5388	3.9614	2.9254	2.8583	3.1277	3.1094	6.0356	3.6383
(e)	f:	0.0513	0.0665	0.0593	0.0476	0.0642	0.0505	0.0546	0.0405
	S [mca/km]:	2.5103	3.2575	2.9014	2.3296	3.1444	2.4718	2.6714	1.9825
(f)	f:	0.0581	0.0599	0.0688	0.0420	0.0736	0.0561	0.0632	0.0420
	S [mca/km]:	4.4377	4.5730	5.2489	3.2085	5.6189	4.2814	4.8225	3.2047
(g)	f:	0.0525	0.0811	0.0774	0.0532	0.0838	0.0608	0.0509	0.0395
	S [mca/km]:	2.2141	3.4183	3.2659	2.2425	3.5357	2.5626	2.1477	1.6676
(h)	f:	0.0327	0.0338	0.0149	0.0219	0.0159	0.0250	0.0479	0.0407
	S [mca/km]:	2.1238	2.1967	0.9642	1.4241	1.0328	1.6203	3.1116	2.6412
(i)	f:	0.0465	0.0744	0.0566	0.0476	0.0615	0.0488	0.0497	0.0396
	S [mca/km]:	1.9238	3.0804	2.3427	1.9729	2.5458	2.0197	2.0562	1.6396
(j)	f:	0.0578	0.0530	0.0698	0.0381	0.0756	0.0565	0.0514	0.0407
	S [mca/km]:	3.2761	3.0064	3.9575	2.1573	4.2849	3.2041	2.9137	2.3099
(k)	f:	0.0463	0.0752	0.0618	0.0498	0.0670	0.0517	0.0505	0.0397
	S [mca/km]:	1.8979	3.0791	2.5297	2.0412	2.7460	2.1185	2.0698	1.6243
(l)	f:	0.0558	0.0526	0.0601	0.0377	0.0652	0.0509	0.0520	0.0406
	S [mca/km]:	3.0259	2.8553	3.2618	2.0449	3.5357	2.7617	2.8215	2.2017
(m)	f:	0.0420	0.0554	0.0291	0.0352	0.0317	0.0330	0.0515	0.0395
	S [mca/km]:	1.6700	2.2000	1.1541	1.3983	1.2594	1.3104	2.0454	1.5683

FIGURA A3.1 – FRENTE 03 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



3.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A3.6 – FRENTE 03 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 03	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	TOTAL
L _{fr} [km]:	0.248	0.035	0.115	0.041	0.395	0.100	0.428	0.043	0.420	0.074	0.246	0.064	0.174	2.381
h _{f_loc} [m]:	0.000	0.016	0.017	0.013	0.026	0.009	0.026	0.008	0.014	0.004	0.007	0.003	0.006	0.148

QUADRO A3.7 – FRENTE 03 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.550	0.609	0.558	0.418	0.604	0.500	0.606	0.441
(b)	0.088	0.099	0.041	0.084	0.044	0.069	0.173	0.111
(c)	0.276	0.300	0.244	0.209	0.263	0.232	0.283	0.227
(d)	0.138	0.153	0.115	0.113	0.123	0.122	0.228	0.142
(e)	0.924	1.180	1.058	0.862	1.141	0.911	0.980	0.741
(f)	0.411	0.422	0.481	0.303	0.512	0.397	0.444	0.303
(g)	0.879	1.318	1.263	0.889	1.360	1.007	0.854	0.675
(h)	0.087	0.090	0.041	0.060	0.044	0.067	0.124	0.106
(i)	0.756	1.173	0.909	0.774	0.982	0.791	0.805	0.652
(j)	0.224	0.207	0.268	0.152	0.289	0.220	0.201	0.162
(k)	0.437	0.686	0.571	0.467	0.616	0.484	0.473	0.378
(l)	0.179	0.170	0.193	0.125	0.208	0.165	0.168	0.133
(m)	0.274	0.354	0.194	0.232	0.211	0.218	0.331	0.258
SUB-TOTAL [m]:	5.371	6.909	6.083	4.836	6.543	5.332	5.817	4.476

QUADRO A3.8 – FRENTE 03 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.594	0.663	0.603	0.442	0.657	0.536	0.660	0.468
(b)	0.092	0.104	0.041	0.088	0.044	0.071	0.188	0.118
(c)	0.298	0.326	0.260	0.220	0.282	0.247	0.305	0.241
(d)	0.146	0.163	0.120	0.117	0.129	0.128	0.249	0.150
(e)	0.995	1.293	1.151	0.923	1.248	0.980	1.059	0.785
(f)	0.444	0.458	0.526	0.320	0.563	0.428	0.483	0.320
(g)	0.952	1.473	1.407	0.964	1.524	1.102	0.923	0.716
(h)	0.090	0.094	0.041	0.061	0.044	0.069	0.133	0.113
(i)	0.812	1.303	0.990	0.833	1.076	0.852	0.868	0.691
(j)	0.244	0.224	0.295	0.160	0.319	0.238	0.217	0.172
(k)	0.469	0.763	0.626	0.505	0.680	0.524	0.512	0.401
(l)	0.195	0.184	0.210	0.131	0.228	0.178	0.182	0.141
(m)	0.292	0.385	0.201	0.244	0.220	0.229	0.358	0.274
SUB-TOTAL [m]:	5.768	7.579	6.619	5.156	7.160	5.729	6.283	4.736

QUADRO A3.9 – FRENTE 03 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.573	0.638	0.583	0.431	0.633	0.519	0.635	0.455
(b)	0.090	0.102	0.041	0.086	0.044	0.070	0.181	0.115
(c)	0.288	0.314	0.252	0.215	0.273	0.240	0.295	0.235
(d)	0.142	0.159	0.118	0.115	0.126	0.125	0.239	0.146
(e)	0.962	1.241	1.109	0.895	1.199	0.948	1.023	0.765
(f)	0.429	0.441	0.505	0.312	0.540	0.414	0.465	0.312
(g)	0.918	1.403	1.342	0.929	1.450	1.059	0.891	0.696
(h)	0.089	0.092	0.041	0.060	0.044	0.068	0.129	0.110
(i)	0.786	1.244	0.952	0.805	1.033	0.824	0.839	0.673
(j)	0.235	0.216	0.283	0.156	0.305	0.230	0.210	0.167
(k)	0.454	0.728	0.601	0.487	0.651	0.505	0.494	0.390
(l)	0.188	0.177	0.202	0.128	0.219	0.172	0.175	0.138
(m)	0.283	0.371	0.198	0.238	0.215	0.224	0.345	0.267
SUB-TOTAL [m]:	5.584	7.274	6.373	5.007	6.879	5.545	6.068	4.614

QUADRO A3.10 – FRENTE 03 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.591	0.659	0.600	0.441	0.653	0.534	0.656	0.466
(b)	0.091	0.104	0.041	0.087	0.044	0.070	0.187	0.117
(c)	0.296	0.324	0.259	0.220	0.281	0.246	0.303	0.240
(d)	0.145	0.162	0.120	0.117	0.128	0.127	0.247	0.149
(e)	0.990	1.285	1.145	0.919	1.240	0.975	1.054	0.782
(f)	0.442	0.455	0.522	0.319	0.559	0.426	0.480	0.319
(g)	0.947	1.461	1.396	0.959	1.511	1.095	0.918	0.713
(h)	0.090	0.093	0.041	0.061	0.044	0.069	0.132	0.112
(i)	0.808	1.294	0.984	0.829	1.069	0.848	0.864	0.689
(j)	0.242	0.222	0.293	0.160	0.317	0.237	0.216	0.171
(k)	0.467	0.757	0.622	0.502	0.676	0.521	0.509	0.400
(l)	0.194	0.183	0.209	0.131	0.226	0.177	0.181	0.141
(m)	0.291	0.383	0.201	0.243	0.219	0.228	0.356	0.273
SUB-TOTAL [m]:	5.741	7.531	6.581	5.135	7.116	5.702	6.251	4.719

FIGURA A3.2 – FRENTE 03 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

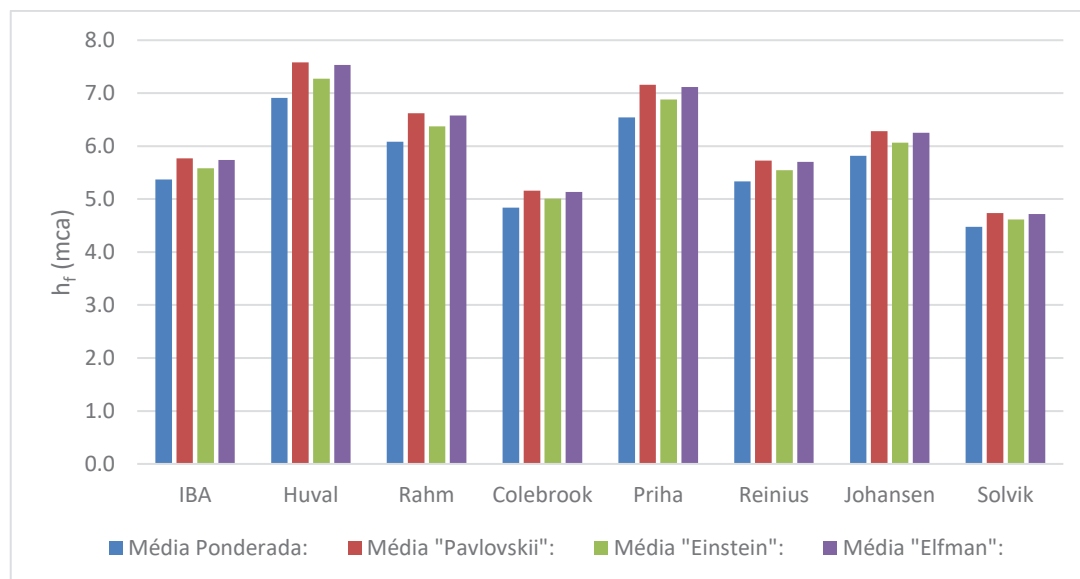
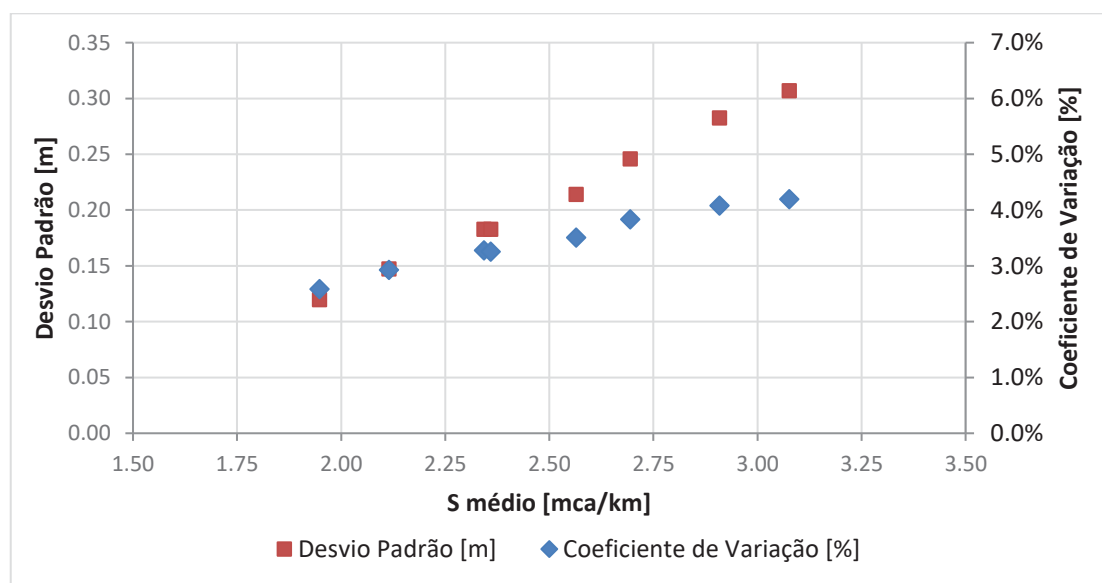


FIGURA A3.3 – FRENTE 03 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



4 FRENTE 04

4.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A4.1 – FRENTE 04 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
V_{med} [m/s]:		2.5571	2.3820	3.0402	3.0075	2.5585	3.1963	2.5177
Re:		2.12E+07	2.04E+07	2.33E+07	2.31E+07	2.11E+07	2.38E+07	2.09E+07
IBA	rms_p [m]:	0.2019	0.2605	0.1371	0.2869	0.2106	0.1885	0.3164
	rms_a [m]:	0.0621	0.1188	0.0640	0.1889	0.0711	0.1201	0.0970
	ϵ [m]:	0.2640	0.3793	0.2011	0.4759	0.2817	0.3087	0.4133
	f:	0.0588	0.0678	0.0542	0.0794	0.0605	0.0659	0.0715
HUVAL	A_n [m ²]:	54.04	50.60	44.28	44.89	53.76	44.01	52.42
	A_m [m ²]:	58.66	62.97	49.34	49.88	58.63	46.93	59.58
	ϵ [m]:	0.3472	0.9274	0.4171	0.4084	0.3666	0.2439	0.5396
	f:	0.0662	0.1064	0.0746	0.0738	0.0680	0.0595	0.0813
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	54.83	51.07	44.62	44.95	54.40	44.05	52.80
	$A_{99\%}$ [m ²]:	63.41	70.45	55.42	59.83	63.81	55.68	67.09
	δ [%]:	15.65	37.95	24.20	33.09	17.31	26.41	27.05
	ϵ [m]:	0.1215	0.9153	0.3332	0.6366	0.1587	0.3911	0.4600
	f:	0.0434	0.1056	0.0673	0.0920	0.0480	0.0734	0.0752
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	8.2749	8.5796	7.6646	7.6798	8.2379	7.4406	8.3122
	$D_{h_1\%}$ [m]:	8.0120	7.8103	7.3092	7.3487	7.9756	7.2951	7.8246
	t_m [m]:	0.1315	0.3847	0.1777	0.1655	0.1312	0.0727	0.2438
	ϵ [m]:	0.1315	0.3847	0.1777	0.1655	0.1312	0.0727	0.2438
	f:	0.0447	0.0682	0.0516	0.0502	0.0447	0.0377	0.0568
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	54.83	51.07	44.62	44.95	54.40	44.05	52.80
	δ [%]:	15.65	37.95	24.20	33.09	17.31	26.41	27.05
	f:	0.0479	0.1155	0.0729	0.0997	0.0529	0.0794	0.0825
REINIUS	δ [%]:	15.65	37.95	24.20	33.09	17.31	26.41	27.05
	f_{inf} :	0.0433	0.0623	0.0506	0.0581	0.0447	0.0524	0.0530
	f_{sup} :	0.0523	0.1125	0.0754	0.0994	0.0567	0.0813	0.0830
	f:	0.0450	0.0807	0.0587	0.0730	0.0477	0.0623	0.0633
WRIGHT	t_n [m]:	0.1355	0.4433	0.1851	0.0661	0.1518	0.0586	0.2403
	$R_{50\%}$ [m]:	2.0665	2.1520	1.9123	1.8671	2.0588	1.8399	2.0779
	$t_n/R_{50\%}$:	0.0656	0.2060	0.0968	0.0354	0.0737	0.0318	0.1156
JOHANSEN	ϵ [m]:	0.3213	0.5346	0.2267	0.3986	0.3204	0.3862	0.3687
	f:	0.0640	0.0796	0.0570	0.0730	0.0640	0.0730	0.0679
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0154	0.0163	0.0128	0.0283	0.0202	0.0233	0.0199
	ϵ [m]:	0.1654	0.1663	0.1628	0.1783	0.1702	0.1733	0.1699
	f:	0.0487	0.0482	0.0499	0.0516	0.0494	0.0517	0.0491

4.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A4.2 – FRENTE 04 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0266	0.0280	0.0234	0.0237	0.0244	0.0238	0.0276	0.0246
	f:	0.0437	0.0484	0.0337	0.0346	0.0366	0.0348	0.0470	0.0372
	S [mca/km]:	1.7591	1.9496	1.3588	1.3923	1.4754	1.4011	1.8925	1.4978
(b)	n:	0.0285	0.0348	0.0347	0.0286	0.0361	0.0308	0.0306	0.0246
	f:	0.0495	0.0738	0.0733	0.0498	0.0795	0.0578	0.0571	0.0369
	S [mca/km]:	1.6697	2.4888	2.4722	1.6790	2.6786	1.9469	1.9236	1.2434
(c)	n:	0.0257	0.0296	0.0283	0.0252	0.0293	0.0266	0.0263	0.0248
	f:	0.0418	0.0553	0.0504	0.0400	0.0541	0.0448	0.0436	0.0389
	S [mca/km]:	2.5674	3.3971	3.0995	2.4596	3.3268	2.7519	2.6793	2.3879
(d)	n:	0.0305	0.0295	0.0326	0.0249	0.0338	0.0294	0.0294	0.0253
	f:	0.0589	0.0551	0.0672	0.0393	0.0722	0.0546	0.0546	0.0403
	S [mca/km]:	3.5330	3.3095	4.0326	2.3576	4.3329	3.2759	3.2759	2.4180
(e)	n:	0.0270	0.0284	0.0245	0.0237	0.0255	0.0244	0.0277	0.0247
	f:	0.0450	0.0498	0.0369	0.0348	0.0401	0.0367	0.0473	0.0378
	S [mca/km]:	1.8243	2.0178	1.4955	1.4075	1.6241	1.4861	1.9148	1.5301
(f)	n:	0.0278	0.0266	0.0292	0.0219	0.0302	0.0271	0.0291	0.0250
	f:	0.0494	0.0452	0.0543	0.0305	0.0583	0.0470	0.0540	0.0400
	S [mca/km]:	3.4559	3.1600	3.8020	2.1360	4.0768	3.2894	3.7822	2.7989
(g)	n:	0.0293	0.0310	0.0299	0.0265	0.0312	0.0277	0.0286	0.0249
	f:	0.0527	0.0590	0.0551	0.0430	0.0598	0.0473	0.0503	0.0380
	S [mca/km]:	2.0480	2.2930	2.1408	1.6730	2.3247	1.8396	1.9557	1.4773

QUADRO A4.3 – FRENTE 04 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “PAVLOVSKII”

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0276	0.0292	0.0240	0.0243	0.0251	0.0244	0.0287	0.0253
	f:	0.0469	0.0524	0.0355	0.0365	0.0388	0.0367	0.0508	0.0394
	S [mca/km]:	1.8900	2.1119	1.4304	1.4684	1.5632	1.4784	2.0452	1.5888
(b)	n:	0.0297	0.0368	0.0367	0.0298	0.0383	0.0323	0.0321	0.0253
	f:	0.0537	0.0826	0.0820	0.0541	0.0893	0.0634	0.0626	0.0391
	S [mca/km]:	1.8110	2.7830	2.7631	1.8219	3.0114	2.1370	2.1095	1.3177
(c)	n:	0.0265	0.0308	0.0293	0.0259	0.0305	0.0275	0.0271	0.0255
	f:	0.0444	0.0599	0.0543	0.0424	0.0586	0.0478	0.0465	0.0411
	S [mca/km]:	2.7281	3.6835	3.3387	2.6055	3.6018	2.9389	2.8558	2.5241
(d)	n:	0.0318	0.0307	0.0342	0.0256	0.0355	0.0306	0.0306	0.0260
	f:	0.0640	0.0596	0.0737	0.0415	0.0795	0.0590	0.0590	0.0426
	S [mca/km]:	3.8392	3.5801	4.4220	2.4903	4.7743	3.5412	3.5412	2.5586
(e)	n:	0.0280	0.0296	0.0252	0.0244	0.0263	0.0251	0.0288	0.0255
	f:	0.0484	0.0540	0.0391	0.0366	0.0427	0.0388	0.0510	0.0401
	S [mca/km]:	1.9617	2.1868	1.5834	1.4833	1.7307	1.5727	2.0668	1.6230
(f)	n:	0.0289	0.0275	0.0304	0.0223	0.0315	0.0281	0.0303	0.0258
	f:	0.0531	0.0483	0.0589	0.0317	0.0634	0.0504	0.0585	0.0424
	S [mca/km]:	3.7191	3.3785	4.1202	2.2201	4.4403	3.5272	4.0971	2.9659
(g)	n:	0.0305	0.0324	0.0312	0.0273	0.0326	0.0288	0.0297	0.0256
	f:	0.0572	0.0645	0.0599	0.0460	0.0655	0.0509	0.0544	0.0402
	S [mca/km]:	2.2214	2.5079	2.3296	1.7874	2.5451	1.9794	2.1140	1.5637

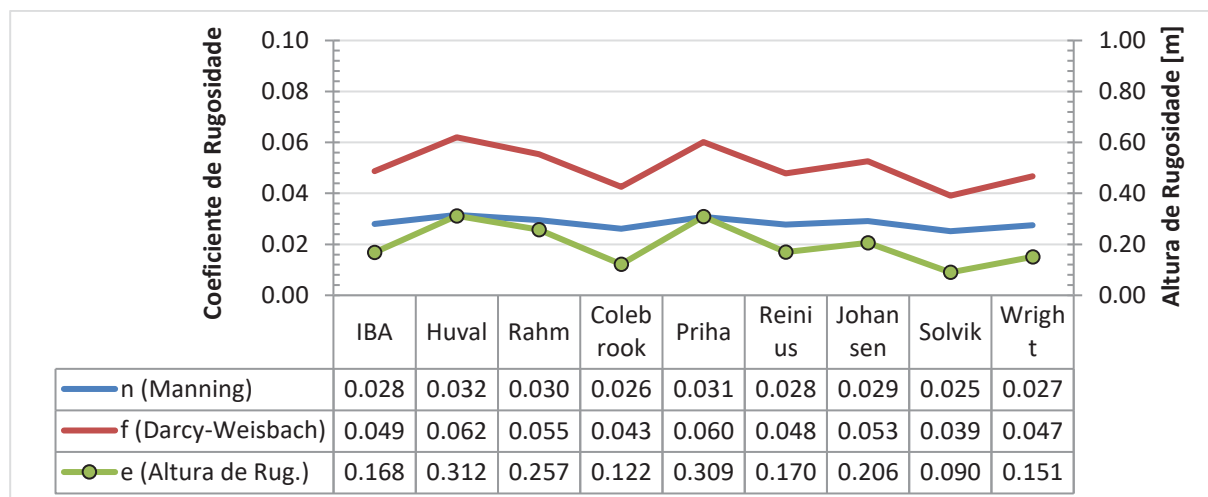
QUADRO A4.4 – FRENTE 04 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0272	0.0287	0.0237	0.0240	0.0248	0.0241	0.0282	0.0250
	f:	0.0454	0.0506	0.0347	0.0356	0.0378	0.0358	0.0490	0.0384
	S [mca/km]:	1.8291	2.0368	1.3966	1.4325	1.5219	1.4420	1.9744	1.5461
(b)	n:	0.0292	0.0359	0.0358	0.0293	0.0374	0.0316	0.0314	0.0250
	f:	0.0518	0.0786	0.0781	0.0521	0.0849	0.0608	0.0601	0.0381
	S [mca/km]:	1.7458	2.6503	2.6319	1.7560	2.8619	2.0501	2.0244	1.2828
(c)	n:	0.0261	0.0302	0.0288	0.0256	0.0299	0.0271	0.0267	0.0252
	f:	0.0432	0.0578	0.0525	0.0413	0.0565	0.0464	0.0451	0.0400
	S [mca/km]:	2.6533	3.5523	3.2286	2.5374	3.4757	2.8522	2.7738	2.4604
(d)	n:	0.0312	0.0302	0.0335	0.0253	0.0347	0.0300	0.0300	0.0256
	f:	0.0616	0.0576	0.0707	0.0405	0.0762	0.0570	0.0570	0.0415
	S [mca/km]:	3.6996	3.4562	4.2458	2.4283	4.5755	3.4197	3.4197	2.4930
(e)	n:	0.0276	0.0291	0.0248	0.0241	0.0259	0.0248	0.0283	0.0251
	f:	0.0469	0.0521	0.0381	0.0357	0.0415	0.0378	0.0493	0.0390
	S [mca/km]:	1.8979	2.1088	1.5422	1.4476	1.6809	1.5320	1.9965	1.5794
(f)	n:	0.0284	0.0271	0.0298	0.0221	0.0309	0.0277	0.0298	0.0254
	f:	0.0514	0.0468	0.0568	0.0312	0.0611	0.0488	0.0565	0.0413
	S [mca/km]:	3.5977	3.2772	3.9742	2.1802	4.2742	3.4172	3.9526	2.8879
(g)	n:	0.0299	0.0318	0.0306	0.0269	0.0320	0.0283	0.0292	0.0252
	f:	0.0551	0.0620	0.0577	0.0446	0.0629	0.0493	0.0525	0.0392
	S [mca/km]:	2.1417	2.4098	2.2431	1.7342	2.4446	1.9148	2.0411	1.5232

QUADRO A4.5 – FRENTE 04 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

Média "Elfman"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0467	0.0522	0.0354	0.0363	0.0387	0.0366	0.0505	0.0393
	S [mca/km]:	1.8812	2.1009	1.4258	1.4635	1.5575	1.4735	2.0348	1.5829
(b)	f:	0.0534	0.0819	0.0814	0.0538	0.0886	0.0630	0.0622	0.0390
	S [mca/km]:	1.8014	2.7616	2.7420	1.8121	2.9869	2.1237	2.0965	1.3129
(c)	f:	0.0442	0.0596	0.0541	0.0422	0.0583	0.0476	0.0463	0.0409
	S [mca/km]:	2.7175	3.6638	3.3225	2.5959	3.5830	2.9264	2.8441	2.5152
(d)	f:	0.0636	0.0593	0.0732	0.0413	0.0790	0.0587	0.0587	0.0425
	S [mca/km]:	3.8170	3.5605	4.3932	2.4810	4.7415	3.5221	3.5221	2.5487
(e)	f:	0.0482	0.0537	0.0390	0.0365	0.0426	0.0387	0.0508	0.0399
	S [mca/km]:	1.9525	2.1753	1.5777	1.4784	1.7236	1.5670	2.0565	1.6169
(f)	f:	0.0529	0.0481	0.0586	0.0316	0.0631	0.0502	0.0582	0.0422
	S [mca/km]:	3.7009	3.3635	4.0979	2.2146	4.4146	3.5108	4.0751	2.9546
(g)	f:	0.0568	0.0641	0.0596	0.0458	0.0651	0.0507	0.0541	0.0401
	S [mca/km]:	2.2095	2.4929	2.3166	1.7798	2.5297	1.9700	2.1032	1.5580

FIGURA A4.1 – FRENTE 04 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



4.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A4.6 – FRENTE 04 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 04	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	TOTAL
L_{fr} [km]:	0.541	0.719	0.455	0.058	0.357	0.069	0.183	2.381
$h_{f,loc}$ [m]:	0.000	0.002	0.014	0.000	0.010	0.013	0.023	0.062

QUADRO A4.7 – FRENTE 04 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.952	1.055	0.735	0.753	0.798	0.758	1.024	0.810
(b)	1.201	1.789	1.778	1.207	1.926	1.400	1.383	0.894
(c)	1.168	1.546	1.410	1.119	1.514	1.252	1.219	1.086
(d)	0.203	0.190	0.232	0.136	0.249	0.188	0.188	0.139
(e)	0.650	0.719	0.533	0.502	0.579	0.530	0.683	0.545
(f)	0.238	0.218	0.262	0.147	0.281	0.227	0.261	0.193
(g)	0.375	0.420	0.392	0.306	0.425	0.337	0.358	0.270
SUB-TOTAL [m]:	4.849	5.999	5.404	4.232	5.835	4.754	5.178	4.001

QUADRO A4.8 – FRENTE 04 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.022	1.143	0.774	0.794	0.846	0.800	1.106	0.860
(b)	1.302	2.001	1.987	1.310	2.165	1.537	1.517	0.947
(c)	1.241	1.676	1.519	1.185	1.639	1.337	1.299	1.148
(d)	0.221	0.206	0.254	0.143	0.275	0.204	0.204	0.147
(e)	0.699	0.780	0.564	0.529	0.617	0.561	0.737	0.579
(f)	0.257	0.233	0.284	0.153	0.306	0.243	0.283	0.205
(g)	0.407	0.459	0.426	0.327	0.466	0.362	0.387	0.286
SUB-TOTAL [m]:	5.211	6.559	5.871	4.504	6.375	5.106	5.595	4.234

QUADRO A4.9 – FRENTE 04 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.990	1.102	0.756	0.775	0.823	0.780	1.068	0.836
(b)	1.255	1.906	1.892	1.263	2.058	1.474	1.456	0.922
(c)	1.207	1.616	1.469	1.155	1.581	1.298	1.262	1.119
(d)	0.213	0.199	0.244	0.140	0.263	0.197	0.197	0.143
(e)	0.677	0.752	0.550	0.516	0.599	0.546	0.712	0.563
(f)	0.248	0.226	0.274	0.150	0.295	0.236	0.273	0.199
(g)	0.392	0.441	0.410	0.317	0.447	0.350	0.374	0.279
SUB-TOTAL [m]:	5.044	6.304	5.658	4.378	6.129	4.943	5.403	4.125

QUADRO A4.10 – FRENTE 04 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.018	1.137	0.771	0.792	0.843	0.797	1.101	0.856
(b)	1.295	1.986	1.971	1.303	2.148	1.527	1.507	0.944
(c)	1.236	1.667	1.512	1.181	1.630	1.332	1.294	1.144
(d)	0.219	0.205	0.253	0.143	0.273	0.203	0.203	0.147
(e)	0.696	0.775	0.562	0.527	0.614	0.559	0.733	0.576
(f)	0.255	0.232	0.283	0.153	0.305	0.242	0.281	0.204
(g)	0.404	0.456	0.424	0.326	0.463	0.361	0.385	0.285
SUB-TOTAL [m]:	5.187	6.520	5.838	4.486	6.337	5.082	5.566	4.219

FIGURA A4.2 – FRENTE 04 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

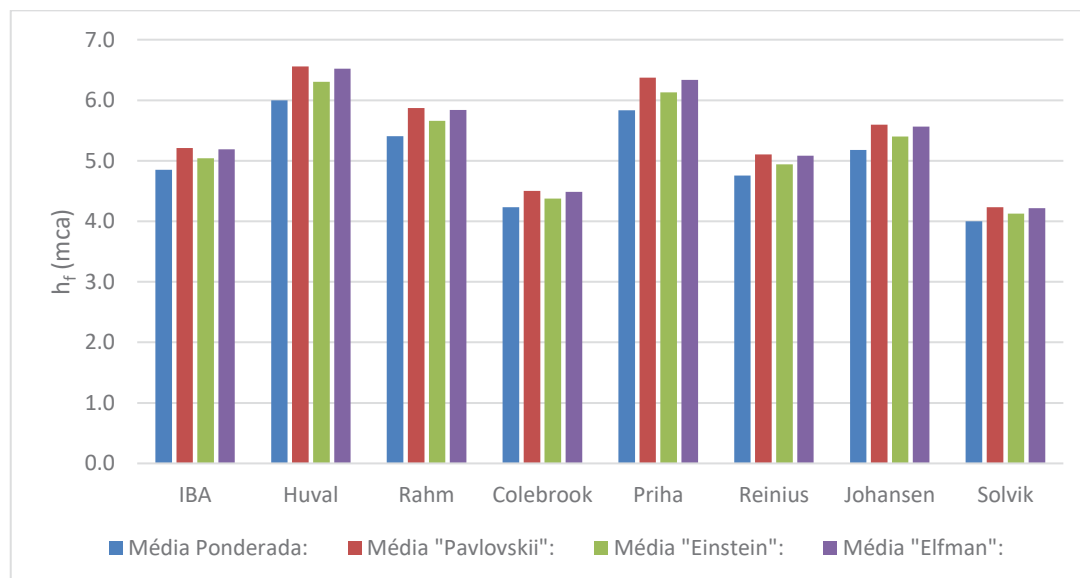
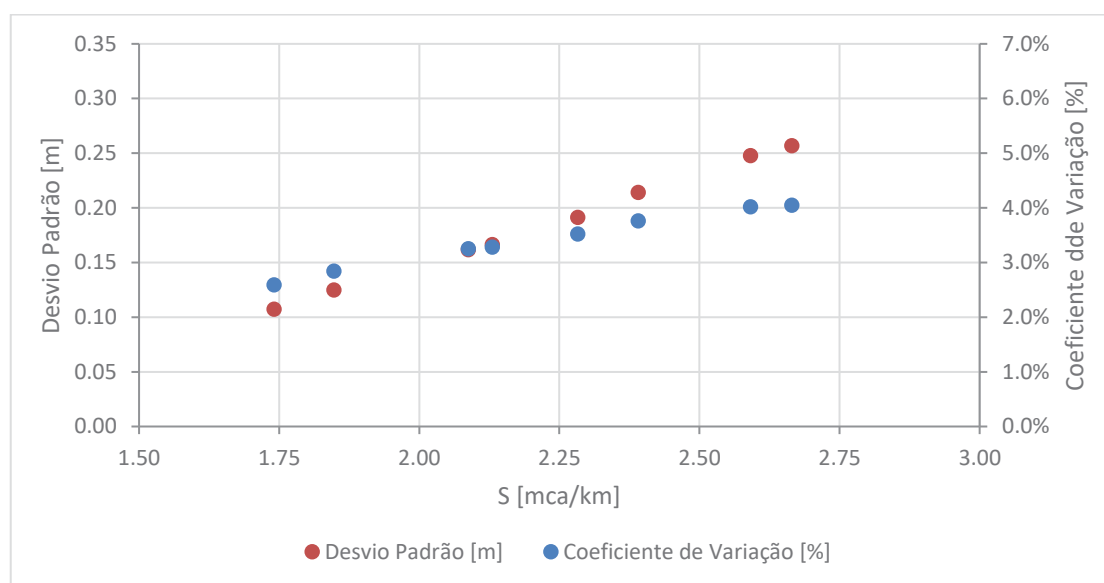


FIGURA A4.3 – FRENTE 04 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



5 FRETE 05

5.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A5.1 – FRETE 05 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
V_{med} [m/s]:		3.1557	2.5279	2.4906	2.6240	2.3808
Re:		2.35E+07	2.09E+07	2.08E+07	2.15E+07	2.04E+07
IBA	rms_p [m]:	0.2876	0.2086	0.2876	0.2380	0.4283
	rms_a [m]:	0.1878	0.0732	0.1341	0.1289	0.1144
	ϵ [m]:	0.4755	0.2818	0.4217	0.3669	0.5426
	f:	0.0807	0.0605	0.0720	0.0682	0.0803
HUAL	A_n [m ²]:	41.01	54.20	46.92	48.46	48.76
	A_m [m ²]:	47.53	59.34	60.23	57.16	63.00
	ϵ [m]:	0.5534	0.3849	1.0276	0.6759	1.0772
	f:	0.0871	0.0694	0.1147	0.0918	0.1162
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	41.43	54.87	47.49	48.54	49.36
	$A_{99\%}$ [m ²]:	57.32	63.82	66.14	64.60	69.10
	δ [%]:	38.36	16.31	39.26	33.10	39.99
	ϵ [m]:	0.8081	0.1357	0.9452	0.6792	1.0006
	f:	0.1067	0.0453	0.1093	0.0921	0.1113
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	7.4331	8.2491	8.3470	8.1902	8.5540
	$D_{h_1\%}$ [m]:	7.0223	7.9761	7.5187	7.6100	7.6779
	t_m [m]:	0.2054	0.1365	0.4141	0.2901	0.4381
	ϵ [m]:	0.2054	0.1365	0.4141	0.2901	0.4381
	f:	0.0554	0.0454	0.0714	0.0615	0.0725
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	41.43	54.87	47.49	48.54	49.36
	δ [%]:	38.36	16.31	39.26	33.10	39.99
	f:	0.1147	0.0499	0.1188	0.1003	0.1214
REINIUS	δ [%]:	38.36	16.31	39.26	33.10	39.99
	f_{inf} :	0.0626	0.0439	0.0634	0.0581	0.0640
	f_{sup} :	0.1136	0.0540	0.1160	0.0994	0.1180
	f:	0.0814	0.0461	0.0828	0.0730	0.0840
WRIGHT	t_n [m]:	0.2399	0.1549	0.4943	0.3510	0.5085
	$R_{50\%}$ [m]:	1.8588	2.0613	2.0958	2.0607	2.1458
	$t_n/R_{50\%}$:	0.1291	0.0752	0.2359	0.1703	0.2370
JOHANSEN	ϵ [m]:	0.4157	0.3523	0.4360	0.3300	0.5296
	f:	0.0756	0.0667	0.0732	0.0650	0.0794
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0235	0.0193	0.0216	0.0164	0.0219
	ϵ [m]:	0.1735	0.1693	0.1716	0.1664	0.1719
	f:	0.0518	0.0492	0.0493	0.0490	0.0488

5.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A5.2 – FRENTE 05 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0301	0.0311	0.0341	0.0255	0.0352	0.0302	0.0292	0.0248
	f:	0.0578	0.0618	0.0740	0.0416	0.0790	0.0582	0.0545	0.0393
	S [mca/km]:	3.9435	4.2180	5.0561	2.8439	5.3936	3.9742	3.7242	2.6838
(b)	n:	0.0268	0.0285	0.0237	0.0237	0.0247	0.0239	0.0280	0.0246
	f:	0.0444	0.0500	0.0347	0.0347	0.0376	0.0352	0.0483	0.0372
	S [mca/km]:	1.7515	1.9728	1.3686	1.3714	1.4856	1.3895	1.9055	1.4687
(c)	n:	0.0291	0.0357	0.0350	0.0290	0.0363	0.0309	0.0293	0.0247
	f:	0.0520	0.0784	0.0751	0.0516	0.0809	0.0587	0.0527	0.0374
	S [mca/km]:	1.9682	2.9708	2.8444	1.9538	3.0658	2.2240	1.9953	1.4179
(d)	n:	0.0285	0.0325	0.0325	0.0272	0.0338	0.0293	0.0279	0.0247
	f:	0.0501	0.0652	0.0654	0.0458	0.0706	0.0532	0.0481	0.0377
	S [mca/km]:	2.1479	2.7943	2.8006	1.9622	3.0238	2.2797	2.0607	1.6146
(e)	n:	0.0307	0.0362	0.0355	0.0293	0.0369	0.0313	0.0305	0.0247
	f:	0.0574	0.0797	0.0767	0.0524	0.0829	0.0597	0.0568	0.0372
	S [mca/km]:	1.9373	2.6915	2.5891	1.7703	2.7985	2.0148	1.9170	1.2580

QUADRO A5.3 – FRENTE 05 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA "PAVLOVSKII"

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0315	0.0327	0.0360	0.0264	0.0373	0.0316	0.0305	0.0256
	f:	0.0633	0.0681	0.0827	0.0445	0.0887	0.0639	0.0595	0.0418
	S [mca/km]:	4.3239	4.6490	5.6501	3.0386	6.0562	4.3601	4.0652	2.8543
(b)	n:	0.0279	0.0297	0.0244	0.0244	0.0255	0.0246	0.0292	0.0253
	f:	0.0479	0.0544	0.0366	0.0367	0.0400	0.0372	0.0524	0.0395
	S [mca/km]:	1.8893	2.1491	1.4467	1.4498	1.5809	1.4706	2.0698	1.5614
(c)	n:	0.0304	0.0379	0.0370	0.0303	0.0386	0.0324	0.0306	0.0254
	f:	0.0567	0.0883	0.0843	0.0562	0.0913	0.0647	0.0575	0.0398
	S [mca/km]:	2.1462	3.3444	3.1918	2.1293	3.4594	2.4488	2.1782	1.5060
(d)	n:	0.0296	0.0341	0.0342	0.0282	0.0356	0.0306	0.0290	0.0254
	f:	0.0543	0.0721	0.0722	0.0493	0.0784	0.0579	0.0519	0.0399
	S [mca/km]:	2.3264	3.0873	3.0948	2.1106	3.3605	2.4804	2.2249	1.7108
(e)	n:	0.0322	0.0384	0.0376	0.0306	0.0392	0.0328	0.0320	0.0255
	f:	0.0630	0.0897	0.0860	0.0572	0.0935	0.0657	0.0623	0.0395
	S [mca/km]:	2.1272	3.0298	2.9061	1.9302	3.1591	2.2191	2.1032	1.3350

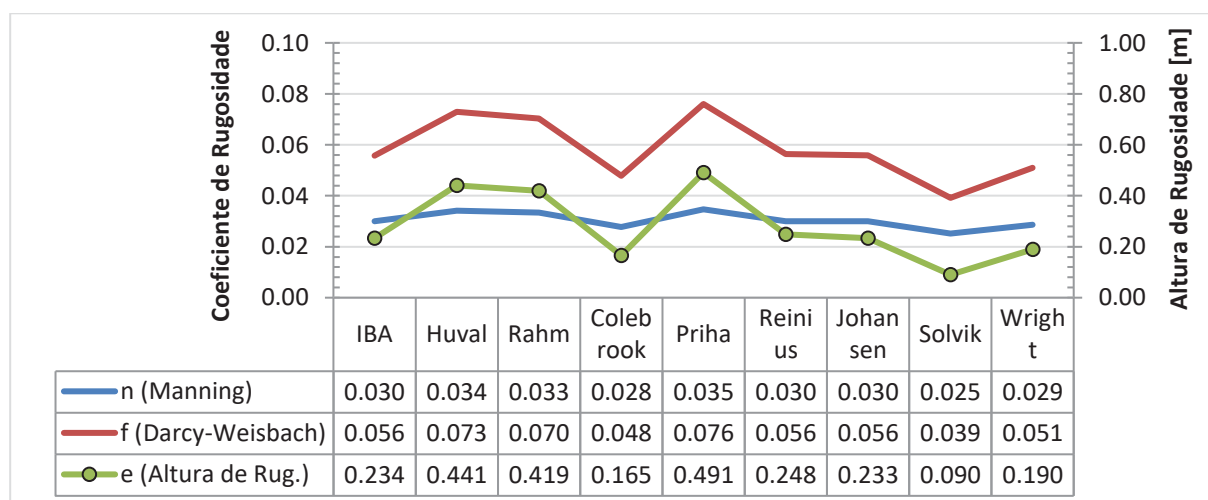
QUADRO A5.4 – FRENTE 05 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0309	0.0320	0.0351	0.0260	0.0363	0.0310	0.0299	0.0252
	f:	0.0608	0.0652	0.0788	0.0432	0.0843	0.0613	0.0572	0.0406
	S [mca/km]:	4.1496	4.4523	5.3817	2.9477	5.7579	4.1833	3.9084	2.7744
(b)	n:	0.0274	0.0291	0.0241	0.0241	0.0251	0.0243	0.0286	0.0250
	f:	0.0462	0.0524	0.0357	0.0358	0.0389	0.0363	0.0505	0.0384
	S [mca/km]:	1.8252	2.0676	1.4098	1.4128	1.5361	1.4323	1.9937	1.5178
(c)	n:	0.0298	0.0370	0.0361	0.0297	0.0376	0.0318	0.0300	0.0251
	f:	0.0545	0.0839	0.0801	0.0541	0.0867	0.0619	0.0553	0.0387
	S [mca/km]:	2.0642	3.1762	3.0351	2.0484	3.2825	2.3460	2.0940	1.4647
(d)	n:	0.0291	0.0334	0.0334	0.0278	0.0348	0.0300	0.0285	0.0251
	f:	0.0524	0.0689	0.0691	0.0477	0.0749	0.0557	0.0502	0.0389
	S [mca/km]:	2.2441	2.9542	2.9612	2.0418	3.2083	2.3882	2.1490	1.6657
(e)	n:	0.0315	0.0374	0.0367	0.0300	0.0382	0.0321	0.0313	0.0251
	f:	0.0604	0.0852	0.0818	0.0550	0.0888	0.0629	0.0598	0.0385
	S [mca/km]:	2.0403	2.8778	2.7634	1.8566	2.9975	2.1258	2.0179	1.2989

QUADRO A5.5 – FRENTE 05 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

Média "Elfman"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0629	0.0676	0.0821	0.0443	0.0879	0.0634	0.0592	0.0416
	S [mca/km]:	4.2958	4.6169	5.6048	3.0247	6.0052	4.3316	4.0402	2.8422
(b)	f:	0.0476	0.0541	0.0365	0.0366	0.0399	0.0371	0.0521	0.0394
	S [mca/km]:	1.8800	2.1369	1.4416	1.4447	1.5746	1.4653	2.0586	1.5553
(c)	f:	0.0563	0.0876	0.0836	0.0559	0.0906	0.0642	0.0572	0.0396
	S [mca/km]:	2.1338	3.3166	3.1661	2.1170	3.4300	2.4328	2.1654	1.5001
(d)	f:	0.0540	0.0716	0.0717	0.0490	0.0779	0.0576	0.0517	0.0398
	S [mca/km]:	2.3140	3.0663	3.0737	2.1004	3.3360	2.4664	2.2136	1.7044
(e)	f:	0.0626	0.0890	0.0854	0.0568	0.0927	0.0653	0.0619	0.0394
	S [mca/km]:	2.1139	3.0048	2.8829	1.9191	3.1323	2.2047	2.0902	1.3299

FIGURA A5.1 – FRENTE 05 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



5.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A5.6 – FRENTE 05 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 05	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	TOTAL
L _{fr} [km]:	0.388	0.410	0.441	0.140	0.499	1.877
h _{f_loc} [m]:	0.013	0.020	0.000	0.001	0.003	0.037

QUADRO A5.7 – FRENTE 05 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.530	1.637	1.962	1.103	2.093	1.542	1.445	1.041
(b)	0.717	0.808	0.560	0.562	0.608	0.569	0.780	0.601
(c)	0.867	1.309	1.253	0.861	1.350	0.980	0.879	0.625
(d)	0.300	0.390	0.391	0.274	0.422	0.318	0.287	0.225
(e)	0.967	1.343	1.292	0.883	1.396	1.005	0.957	0.628
SUB-TOTAL [m]:	4.417	5.523	5.494	3.719	5.906	4.451	4.385	3.157

QUADRO A5.8 – FRENTE 05 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.678	1.804	2.192	1.179	2.350	1.692	1.577	1.107
(b)	0.774	0.880	0.592	0.594	0.647	0.602	0.848	0.639
(c)	0.945	1.473	1.406	0.938	1.524	1.079	0.959	0.663
(d)	0.325	0.431	0.432	0.294	0.469	0.346	0.310	0.239
(e)	1.061	1.512	1.450	0.963	1.576	1.107	1.050	0.666
SUB-TOTAL [m]:	4.819	6.136	6.109	4.005	6.603	4.863	4.781	3.352

QUADRO A5.9 – FRENTE 05 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.610	1.727	2.088	1.144	2.234	1.623	1.516	1.076
(b)	0.747	0.847	0.577	0.579	0.629	0.587	0.816	0.622
(c)	0.909	1.399	1.337	0.902	1.446	1.033	0.922	0.645
(d)	0.313	0.412	0.413	0.285	0.448	0.333	0.300	0.232
(e)	1.018	1.436	1.379	0.926	1.496	1.061	1.007	0.648
SUB-TOTAL [m]:	4.634	5.858	5.831	3.872	6.289	4.674	4.599	3.260

QUADRO A5.10 – FRENTE 05 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	1.667	1.791	2.175	1.174	2.330	1.681	1.568	1.103
(b)	0.770	0.875	0.590	0.592	0.645	0.600	0.843	0.637
(c)	0.940	1.461	1.395	0.933	1.511	1.072	0.954	0.661
(d)	0.323	0.428	0.429	0.293	0.465	0.344	0.309	0.238
(e)	1.055	1.499	1.439	0.958	1.563	1.100	1.043	0.664
SUB-TOTAL [m]:	4.791	6.091	6.064	3.985	6.551	4.833	4.753	3.338

FIGURA A5.2 – FRENTE 05 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

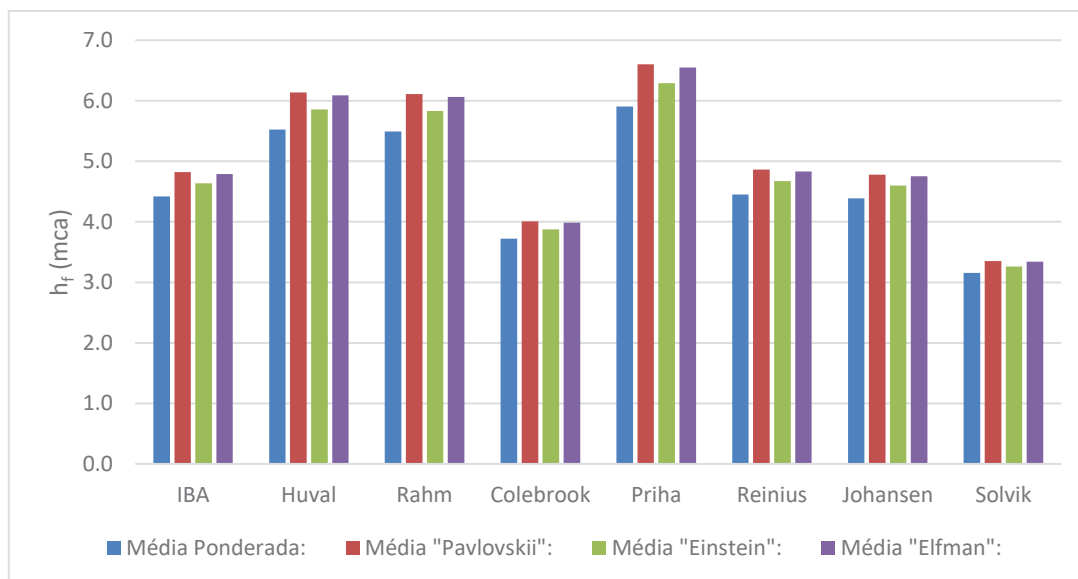
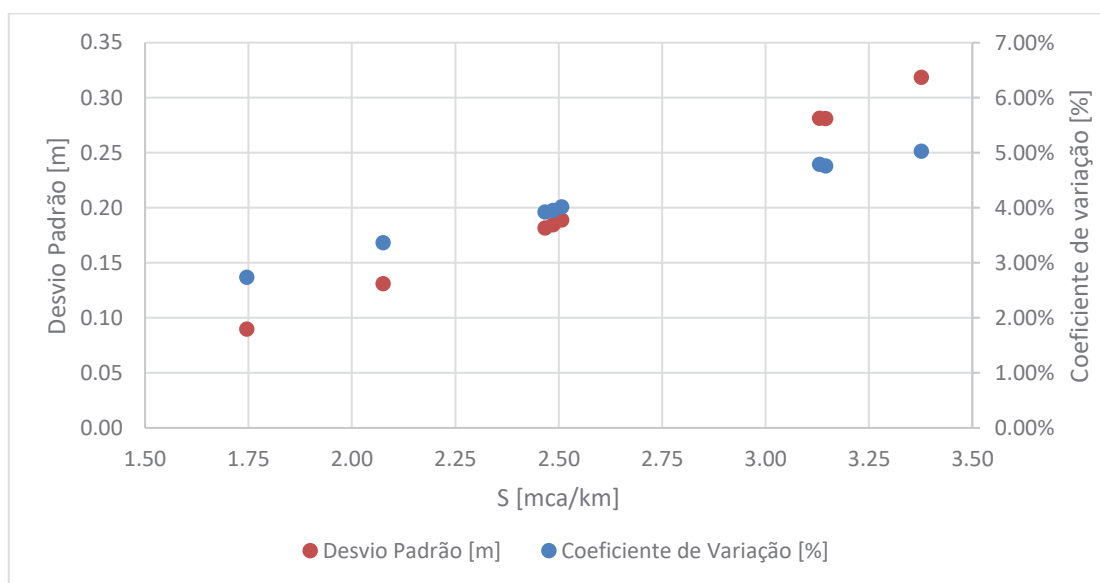


FIGURA A5.3 – FRENTE 05 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



6 FRETE 06

6.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A6.1 – FRETE 06 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
V_{med} [m/s]:		2.8908	2.3861	2.9391	2.3903	2.9327
Re:		2.28E+07	2.06E+07	2.30E+07	2.05E+07	2.31E+07
IBA	rms_p [m]:	0.1425	0.2075	0.0379	0.2956	0.0619
	rms_a [m]:	0.0942	0.0648	0.0167	0.0601	0.0200
	ϵ [m]:	0.2367	0.2723	0.0546	0.3557	0.0818
	f:	0.0573	0.0585	0.0338	0.0658	0.0385
HUVAL	A_n [m ²]:	50.34	58.12	50.50	57.34	49.24
	A_m [m ²]:	51.89	62.86	51.04	62.75	51.15
	ϵ [m]:	0.1220	0.3444	0.0428	0.3946	0.1521
	f:	0.0443	0.0648	0.0313	0.0690	0.0481
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	50.34	58.58	50.34	58.90	48.72
	$A_{99\%}$ [m ²]:	62.26	67.47	54.15	67.56	52.04
	δ [%]:	23.66	15.18	7.57	14.71	6.81
	ϵ [m]:	0.3261	0.1162	0.0101	0.1059	0.0066
	f:	0.0657	0.0421	0.0210	0.0408	0.0189
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	7.8907	8.6174	7.8235	8.5880	7.8612
	$D_{h_1\%}$ [m]:	7.7933	8.3367	7.7665	8.3578	7.6970
	t_m [m]:	0.0487	0.1403	0.0285	0.1151	0.0821
	ϵ [m]:	0.0487	0.1403	0.0285	0.1151	0.0821
	f:	0.0325	0.0451	0.0277	0.0420	0.0385
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	50.34	58.58	50.34	58.90	48.72
	δ [%]:	23.66	15.18	7.57	14.71	6.81
	f:	0.0719	0.0467	0.0230	0.0452	0.0207
REINIUS	δ [%]:	23.66	15.18	7.57	14.71	6.81
	f_{inf} :	0.0501	0.0429	0.0364	0.0425	0.0358
	f_{sup} :	0.0739	0.0510	0.0304	0.0497	0.0284
	f:	0.0579	0.0443	0.0321	0.0435	0.0309
WRIGHT	t_n [m]:	0.0281	0.1476	0.0217	0.1299	0.0976
	$R_{50\%}$ [m]:	1.9582	2.1522	1.9535	2.1457	1.9662
	$t_n/R_{50\%}$:	0.0144	0.0686	0.0111	0.0605	0.0496
JOHANSEN	ϵ [m]:	0.2337	0.5110	0.1932	0.5064	0.2025
	f:	0.0570	0.0777	0.0529	0.0775	0.0538
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0134	0.0158	0.0100	0.0171	0.0108
	ϵ [m]:	0.1634	0.1658	0.1600	0.1671	0.1608
	f:	0.0494	0.0480	0.0492	0.0482	0.0492

6.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A6.2 – FRENTE 06 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0265	0.0237	0.0282	0.0208	0.0293	0.0266	0.0264	0.0248
	f:	0.0440	0.0351	0.0496	0.0270	0.0537	0.0443	0.0438	0.0386
	S [mca/km]:	2.3732	1.8972	2.6783	1.4579	2.8997	2.3939	2.3621	2.0857
(b)	n:	0.0271	0.0283	0.0235	0.0242	0.0245	0.0240	0.0307	0.0248
	f:	0.0445	0.0486	0.0335	0.0355	0.0365	0.0349	0.0571	0.0375
	S [mca/km]:	1.4985	1.6376	1.1275	1.1955	1.2304	1.1768	1.9242	1.2616
(c)	n:	0.0211	0.0204	0.0173	0.0194	0.0180	0.0207	0.0256	0.0248
	f:	0.0280	0.0262	0.0189	0.0237	0.0203	0.0268	0.0412	0.0386
	S [mca/km]:	1.5738	1.4758	1.0614	1.3338	1.1440	1.5088	2.3158	2.1713
(d)	n:	0.0284	0.0290	0.0231	0.0234	0.0241	0.0238	0.0305	0.0248
	f:	0.0491	0.0512	0.0325	0.0333	0.0354	0.0343	0.0567	0.0375
	S [mca/km]:	1.6651	1.7349	1.1015	1.1295	1.2019	1.1637	1.9242	1.2705
(e)	n:	0.0226	0.0249	0.0167	0.0226	0.0173	0.0206	0.0262	0.0252
	f:	0.0320	0.0389	0.0175	0.0320	0.0188	0.0265	0.0430	0.0396
	S [mca/km]:	1.7843	2.1692	0.9754	1.7860	1.0503	1.4756	2.3957	2.2103

QUADRO A6.3 – FRENTE 06 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA "PAVLOVSKII"

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0274	0.0243	0.0292	0.0211	0.0305	0.0275	0.0273	0.0255
	f:	0.0469	0.0369	0.0533	0.0278	0.0581	0.0473	0.0466	0.0408
	S [mca/km]:	2.5292	1.9902	2.8789	1.5024	3.1345	2.5528	2.5164	2.2025
(b)	n:	0.0280	0.0293	0.0240	0.0248	0.0252	0.0246	0.0320	0.0255
	f:	0.0476	0.0523	0.0351	0.0373	0.0385	0.0367	0.0622	0.0396
	S [mca/km]:	1.6024	1.7625	1.1812	1.2577	1.2971	1.2366	2.0951	1.3324
(c)	n:	0.0214	0.0207	0.0174	0.0196	0.0181	0.0210	0.0264	0.0255
	f:	0.0289	0.0270	0.0190	0.0242	0.0206	0.0276	0.0436	0.0407
	S [mca/km]:	1.6246	1.5173	1.0719	1.3630	1.1593	1.5534	2.4542	2.2907
(d)	n:	0.0295	0.0302	0.0236	0.0240	0.0248	0.0243	0.0319	0.0255
	f:	0.0530	0.0553	0.0340	0.0349	0.0373	0.0360	0.0618	0.0396
	S [mca/km]:	1.7956	1.8765	1.1523	1.1838	1.2654	1.2222	2.0970	1.3430
(e)	n:	0.0230	0.0255	0.0168	0.0230	0.0174	0.0208	0.0269	0.0258
	f:	0.0331	0.0408	0.0176	0.0332	0.0190	0.0271	0.0453	0.0416
	S [mca/km]:	1.8486	2.2739	0.9812	1.8504	1.0593	1.5124	2.5266	2.3197

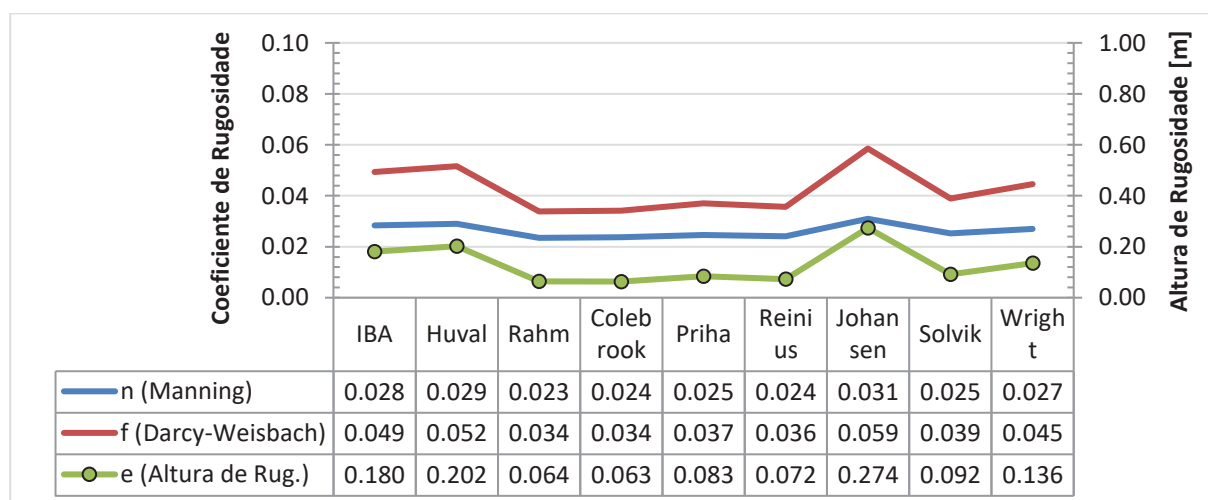
QUADRO A6.4 – FRENTE 06 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0270	0.0240	0.0287	0.0209	0.0299	0.0271	0.0269	0.0252
	f:	0.0455	0.0361	0.0516	0.0274	0.0561	0.0459	0.0453	0.0398
	S [mca/km]:	2.4568	1.9465	2.7865	1.4811	3.0269	2.4791	2.4448	2.1479
(b)	n:	0.0276	0.0289	0.0238	0.0245	0.0249	0.0243	0.0314	0.0252
	f:	0.0462	0.0506	0.0343	0.0365	0.0376	0.0359	0.0599	0.0386
	S [mca/km]:	1.5543	1.7050	1.1559	1.2285	1.2658	1.2085	2.0171	1.2993
(c)	n:	0.0213	0.0206	0.0174	0.0195	0.0181	0.0208	0.0260	0.0252
	f:	0.0284	0.0266	0.0190	0.0240	0.0205	0.0272	0.0425	0.0397
	S [mca/km]:	1.6004	1.4974	1.0668	1.3489	1.1519	1.5321	2.3898	2.2349
(d)	n:	0.0290	0.0296	0.0234	0.0237	0.0245	0.0241	0.0313	0.0252
	f:	0.0512	0.0534	0.0333	0.0342	0.0364	0.0352	0.0595	0.0386
	S [mca/km]:	1.7355	1.8114	1.1283	1.1582	1.2356	1.1946	2.0180	1.3090
(e)	n:	0.0228	0.0252	0.0167	0.0228	0.0174	0.0207	0.0266	0.0255
	f:	0.0326	0.0399	0.0175	0.0326	0.0189	0.0268	0.0442	0.0407
	S [mca/km]:	1.8182	2.2251	0.9784	1.8200	1.0549	1.4948	2.4660	2.2688

QUADRO A6.5 – FRENTE 06 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

Média "Elfman"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0467	0.0368	0.0531	0.0278	0.0578	0.0471	0.0464	0.0407
	S [mca/km]:	2.5188	1.9841	2.8653	1.4996	3.1184	2.5422	2.5061	2.1948
(b)	f:	0.0474	0.0521	0.0350	0.0372	0.0384	0.0366	0.0619	0.0394
	S [mca/km]:	1.5956	1.7542	1.1778	1.2537	1.2928	1.2328	2.0835	1.3279
(c)	f:	0.0288	0.0269	0.0190	0.0242	0.0206	0.0276	0.0435	0.0406
	S [mca/km]:	1.6216	1.5148	1.0713	1.3612	1.1585	1.5507	2.4453	2.2831
(d)	f:	0.0527	0.0551	0.0339	0.0348	0.0372	0.0359	0.0615	0.0395
	S [mca/km]:	1.7869	1.8670	1.1491	1.1803	1.2614	1.2185	2.0852	1.3384
(e)	f:	0.0331	0.0407	0.0176	0.0331	0.0190	0.0271	0.0452	0.0415
	S [mca/km]:	1.8446	2.2673	0.9809	1.8465	1.0588	1.5102	2.5183	2.3128

FIGURA A6.1 – FRENTE 06 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



6.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A6.6 – FRENTE 06 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 06	(a)	(b)	(c)	(d)	(d)	TOTAL
L_{fr} [km]:	0.048	0.175	0.013	0.689	0.029	0.954
h_{f_loc} [m]:	0.008	0.013	0.010	0.015	0.009	0.055

QUADRO A6.7 – FRENTE 06 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.114	0.091	0.129	0.070	0.139	0.115	0.113	0.100
(b)	0.261	0.286	0.197	0.209	0.215	0.205	0.336	0.220
(c)	0.020	0.019	0.014	0.017	0.015	0.020	0.030	0.028
(d)	1.147	1.195	0.759	0.778	0.828	0.802	1.326	0.875
(e)	0.052	0.063	0.028	0.052	0.030	0.043	0.069	0.064
SUB-TOTAL [m]:	1.650	1.710	1.182	1.181	1.283	1.240	1.930	1.343

QUADRO A6.8 – FRENTE 06 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.121	0.096	0.138	0.072	0.150	0.123	0.121	0.106
(b)	0.280	0.308	0.206	0.219	0.226	0.216	0.366	0.233
(c)	0.021	0.020	0.014	0.018	0.015	0.020	0.032	0.030
(d)	1.237	1.293	0.794	0.816	0.872	0.842	1.445	0.925
(e)	0.054	0.066	0.028	0.054	0.031	0.044	0.073	0.067
SUB-TOTAL [m]:	1.768	1.837	1.236	1.234	1.350	1.300	2.092	1.416

QUADRO A6.9 – FRENTE 04 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.118	0.093	0.134	0.071	0.145	0.119	0.117	0.103
(b)	0.271	0.298	0.202	0.214	0.221	0.211	0.352	0.227
(c)	0.021	0.019	0.014	0.018	0.015	0.020	0.031	0.029
(d)	1.196	1.248	0.777	0.798	0.851	0.823	1.390	0.902
(e)	0.053	0.065	0.028	0.053	0.031	0.043	0.072	0.066
SUB-TOTAL [m]:	1.714	1.778	1.210	1.209	1.318	1.272	2.018	1.382

QUADRO A6.10 – FRENTE 06 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.121	0.095	0.138	0.072	0.150	0.122	0.120	0.105
(b)	0.278	0.306	0.206	0.219	0.226	0.215	0.364	0.232
(c)	0.021	0.020	0.014	0.018	0.015	0.020	0.032	0.030
(d)	1.231	1.286	0.792	0.813	0.869	0.840	1.437	0.922
(e)	0.053	0.066	0.028	0.054	0.031	0.044	0.073	0.067
SUB-TOTAL [m]:	1.760	1.828	1.233	1.231	1.345	1.296	2.081	1.411

FIGURA A6.2 – FRENTE 06 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

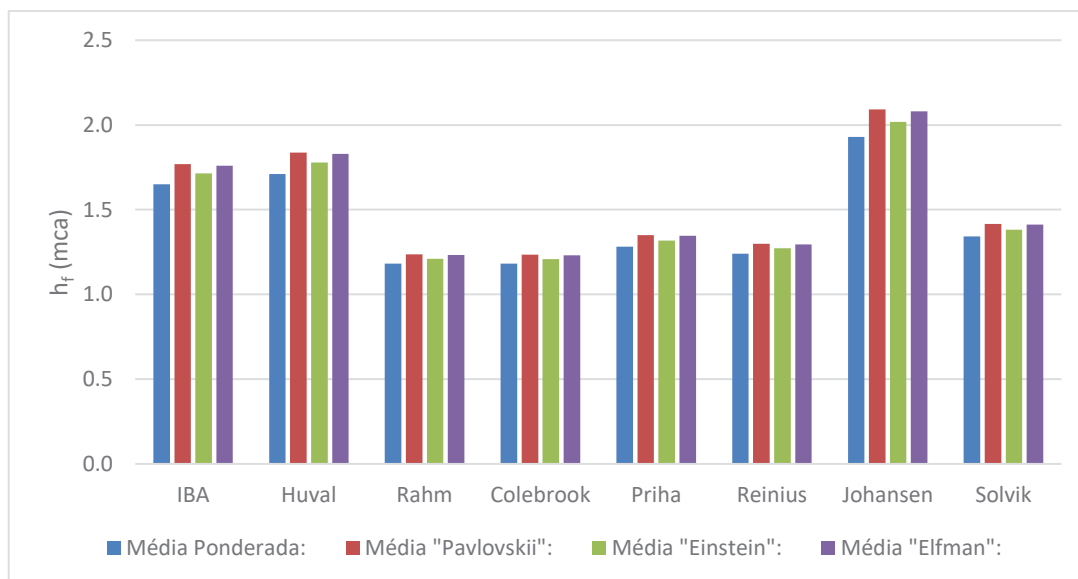
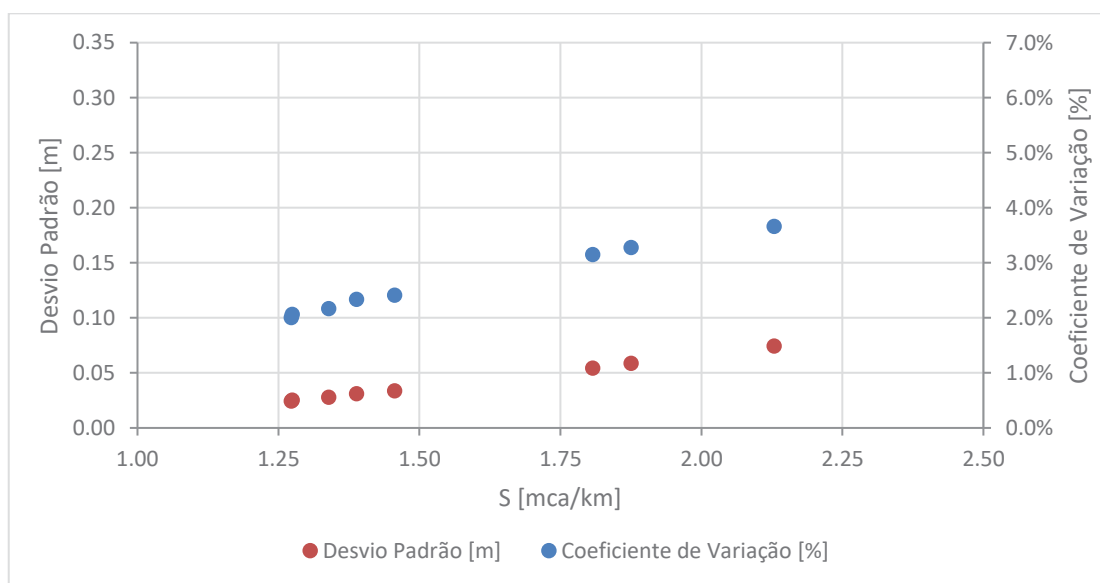


FIGURA A6.3 – FRENTE 06 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



7 FRENTE 8

7.1 ESTIMATIVA DE RUGOSIDADE DE ROCHA

QUADRO A7.1 – FRENTE 08 – RUGOSIDADES DE ROCHA

TRECHO:		(a)	(b)	(c)	(d)
V_{med} [m/s]:		2.5616	2.7912	3.4749	2.7912
Re:		2.11E+07	2.21E+07	2.49E+07	2.20E+07
IBA	rms_p [m]:	0.2656	0.2348	0.0617	0.2962
	rms_a [m]:	0.1424	0.1207	0.0270	0.0653
	ϵ [m]:	0.4081	0.3554	0.0887	0.3614
	f:	0.0713	0.0682	0.0409	0.0688
HUVAL	A_n [m ²]:	45.76	42.76	41.50	45.05
	A_m [m ²]:	58.56	53.74	43.17	53.74
	ϵ [m]:	1.0014	0.8935	0.1449	0.6985
	f:	0.1137	0.1089	0.0489	0.0953
RAHM	$A_{1\%}$ [m ²]:	46.25	43.22	41.57	49.53
	$A_{99\%}$ [m ²]:	64.32	60.21	44.87	57.95
	δ [%]:	39.06	39.32	7.95	17.00
	ϵ [m]:	0.9260	0.9011	0.0112	0.1451
	f:	0.1087	0.1094	0.0220	0.0472
COLEBROOK	D_{h_med} [m]:	8.2511	7.9357	7.1681	7.8988
	$D_{h_1\%}$ [m]:	7.3928	7.1644	7.0611	7.6483
	t_m [m]:	0.4291	0.3857	0.0535	0.1253
	ϵ [m]:	0.4291	0.3857	0.0535	0.1253
	f:	0.0730	0.0708	0.0345	0.0447
PRIHA	$A_{1\%}$ [m ²]:	46.25	43.22	41.57	49.53
	δ [%]:	39.06	39.32	7.95	17.00
	f:	0.1179	0.1180	0.0238	0.0516
REINIUS	δ [%]:	39.06	39.32	7.95	17.00
	f_{inf} :	0.0632	0.0634	0.0368	0.0444
	f_{sup} :	0.1155	0.1162	0.0315	0.0559
	f:	0.0825	0.0829	0.0327	0.0472
WRIGHT	t_n [m]:	0.4823	0.4306	0.0704	0.1573
	$R_{50\%}$ [m]:	2.0734	1.9929	1.7946	1.9740
	$t_n/R_{50\%}$:	0.2326	0.2161	0.0392	0.0797
JOHANSEN	ϵ [m]:	0.3801	0.3703	0.5464	0.3298
	f:	0.0690	0.0695	0.0881	0.0661
SOLVIK	ϵ_a [m]:	0.0192	0.0195	0.0144	0.0219
	ϵ [m]:	0.1692	0.1695	0.1644	0.1719
	f:	0.0492	0.0500	0.0514	0.0503

7.2 COMPOSIÇÃO DE RUGOSIDADES

QUADRO A7.2 – FRENTE 08 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA PONDERADA

Média Ponderada		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0290	0.0357	0.0350	0.0293	0.0363	0.0310	0.0286	0.0247
	f:	0.0520	0.0787	0.0756	0.0531	0.0813	0.0591	0.0505	0.0377
	S [mca/km]:	2.1084	3.1911	3.0639	2.1522	3.2968	2.3961	2.0489	1.5284
(b)	n:	0.0284	0.0350	0.0350	0.0289	0.0362	0.0309	0.0286	0.0248
	f:	0.0503	0.0763	0.0767	0.0520	0.0821	0.0598	0.0512	0.0385
	S [mca/km]:	2.5188	3.8187	3.8355	2.6026	4.1066	2.9933	2.5603	1.9246
(c)	n:	0.0225	0.0243	0.0174	0.0210	0.0180	0.0205	0.0315	0.0249
	f:	0.0328	0.0383	0.0196	0.0284	0.0209	0.0272	0.0642	0.0400
	S [mca/km]:	2.8177	3.2877	1.6858	2.4399	1.7934	2.3344	5.5133	3.4302
(d)	n:	0.0283	0.0327	0.0241	0.0235	0.0250	0.0241	0.0278	0.0247
	f:	0.0501	0.0667	0.0362	0.0346	0.0391	0.0362	0.0484	0.0383
	S [mca/km]:	2.5202	3.3547	1.8212	1.7389	1.9653	1.8216	2.4315	1.9247

QUADRO A7.3 – FRENTE 08 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “PAVLOVSKII”

Média "Pavlovskii"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0303	0.0378	0.0370	0.0306	0.0385	0.0324	0.0298	0.0255
	f:	0.0566	0.0883	0.0845	0.0578	0.0914	0.0649	0.0548	0.0400
	S [mca/km]:	2.2922	3.5787	3.4259	2.3436	3.7059	2.6307	2.2227	1.6207
(b)	n:	0.0295	0.0369	0.0370	0.0301	0.0384	0.0324	0.0298	0.0255
	f:	0.0545	0.0851	0.0855	0.0564	0.0920	0.0656	0.0554	0.0408
	S [mca/km]:	2.7248	4.2598	4.2798	2.8225	4.6044	3.2804	2.7732	2.0399
(c)	n:	0.0230	0.0250	0.0175	0.0213	0.0181	0.0208	0.0330	0.0256
	f:	0.0342	0.0404	0.0199	0.0294	0.0212	0.0280	0.0703	0.0423
	S [mca/km]:	2.9401	3.4682	1.7048	2.5210	1.8192	2.4050	6.0355	3.6295
(d)	n:	0.0295	0.0344	0.0248	0.0241	0.0258	0.0248	0.0289	0.0255
	f:	0.0544	0.0741	0.0383	0.0365	0.0416	0.0383	0.0524	0.0407
	S [mca/km]:	2.7359	3.7240	1.9265	1.8329	2.0917	1.9271	2.6320	2.0450

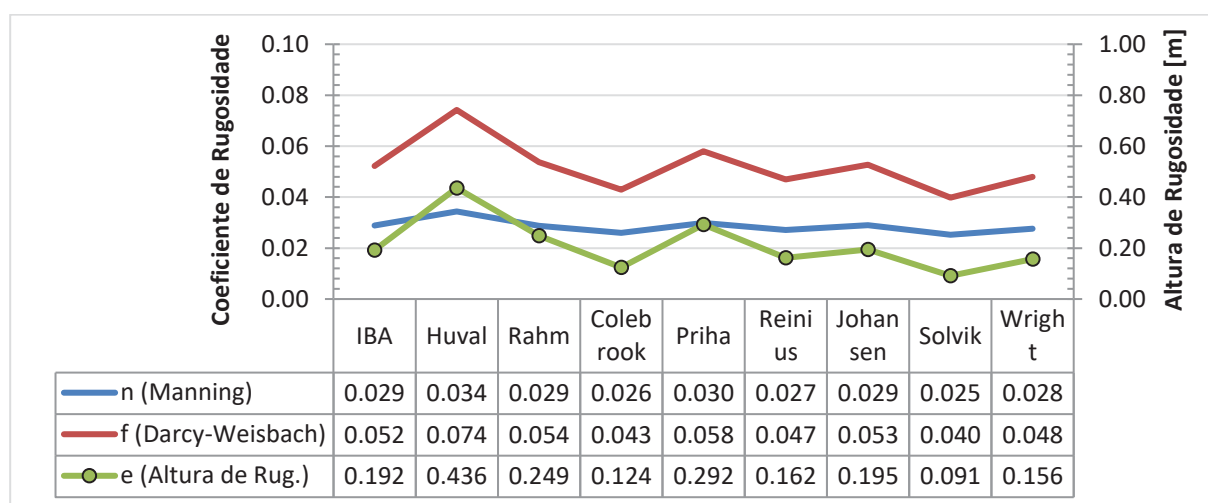
QUADRO A7.4 – FRENTE 08 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “EINSTEIN”

Média "Einstein"		IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	n:	0.0297	0.0369	0.0361	0.0300	0.0375	0.0318	0.0293	0.0251
	f:	0.0545	0.0840	0.0805	0.0556	0.0869	0.0623	0.0529	0.0389
	S [mca/km]:	2.2076	3.4045	3.2628	2.2556	3.5224	2.5236	2.1426	1.5774
(b)	n:	0.0290	0.0360	0.0361	0.0295	0.0374	0.0317	0.0293	0.0252
	f:	0.0526	0.0812	0.0815	0.0544	0.0876	0.0629	0.0535	0.0397
	S [mca/km]:	2.6298	4.0613	4.0798	2.7213	4.3812	3.1494	2.6752	1.9859
(c)	n:	0.0228	0.0247	0.0175	0.0212	0.0180	0.0207	0.0323	0.0252
	f:	0.0336	0.0394	0.0197	0.0289	0.0210	0.0276	0.0675	0.0412
	S [mca/km]:	2.8823	3.3837	1.6955	2.4823	1.8066	2.3712	5.7983	3.5364
(d)	n:	0.0290	0.0336	0.0244	0.0238	0.0254	0.0244	0.0284	0.0251
	f:	0.0524	0.0707	0.0373	0.0356	0.0404	0.0373	0.0505	0.0396
	S [mca/km]:	2.6363	3.5563	1.8770	1.7886	2.0325	1.8774	2.5392	1.9886

QUADRO A7.5 – FRENTE 08 – COMPOSIÇÃO POR MÉDIA “ELFMAN”

	Média "Elfman"	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	f:	0.0562	0.0876	0.0839	0.0575	0.0907	0.0645	0.0545	0.0398
	S [mca/km]:	2.2793	3.5499	3.3992	2.3301	3.6753	2.6140	2.2105	1.6145
(b)	f:	0.0542	0.0845	0.0849	0.0561	0.0913	0.0652	0.0551	0.0406
	S [mca/km]:	2.7105	4.2272	4.2470	2.8071	4.5673	3.2600	2.7584	2.0321
(c)	f:	0.0342	0.0403	0.0198	0.0293	0.0212	0.0280	0.0699	0.0421
	S [mca/km]:	2.9324	3.4564	1.7037	2.5160	1.8177	2.4007	5.9986	3.6164
(d)	f:	0.0541	0.0735	0.0382	0.0363	0.0414	0.0382	0.0521	0.0405
	S [mca/km]:	2.7210	3.6974	1.9197	1.8268	2.0833	1.9202	2.6183	2.0371

FIGURA A7.1 – FRENTE 08 – GRÁFICO RESUMO DE RUGOSIDADES COMPOSTAS



7.3 PERDAS DE CARGA RESULTANTES

QUADRO A7.6 – FRENTE 08 - COMPRIMENTOS E PERDAS LOCALIZADAS ENTRE TRECHOS

FRENTE 08	(a)	(b)	(c)	(d)	TOTAL
L _{fr} [km]:	0.144	0.333	0.056	0.706	1.238
h _{f,loc} [m]:	0.000	0.002	0.015	0.024	0.040

QUADRO A7.7 – FRENTE 08 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA PONDERADA

MÉDIA PONDERADA	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.303	0.458	0.440	0.309	0.473	0.344	0.294	0.219
(b)	0.837	1.270	1.275	0.865	1.365	0.995	0.851	0.640
(c)	0.158	0.184	0.094	0.137	0.100	0.131	0.309	0.192
(d)	1.778	2.367	1.285	1.227	1.387	1.285	1.715	1.358
SUB-TOTAL [m]:	3.116	4.319	3.134	2.578	3.366	2.795	3.210	2.449

QUADRO A7.8 – FRENTE 08 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “PAVLOVSKII”

MÉDIA “PAVLOVSKII”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.329	0.514	0.492	0.336	0.532	0.378	0.319	0.233
(b)	0.906	1.416	1.423	0.938	1.531	1.091	0.922	0.678
(c)	0.165	0.194	0.095	0.141	0.102	0.135	0.338	0.203
(d)	1.930	2.627	1.359	1.293	1.476	1.360	1.857	1.443
SUB-TOTAL [m]:	3.370	4.792	3.409	2.749	3.680	3.003	3.476	2.597

QUADRO A7.9 – FRENTE 08 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “EINSTEIN”

MÉDIA “EINSTEIN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.317	0.489	0.468	0.324	0.505	0.362	0.307	0.226
(b)	0.874	1.350	1.357	0.905	1.457	1.047	0.889	0.660
(c)	0.161	0.189	0.095	0.139	0.101	0.133	0.325	0.198
(d)	1.860	2.509	1.324	1.262	1.434	1.325	1.791	1.403
SUB-TOTAL [m]:	3.253	4.577	3.284	2.669	3.537	2.907	3.353	2.528

QUADRO A7.10 – FRENTE 08 – PERDAS DE CARGA DOS TRECHOS - MÉDIA “ELFMAN”

MÉDIA “ELFMAN”	IBA	Huval	Rahm	Colebrook	Priha	Reinius	Johansen	Solvik
(a)	0.327	0.509	0.488	0.334	0.527	0.375	0.317	0.232
(b)	0.901	1.406	1.412	0.933	1.519	1.084	0.917	0.676
(c)	0.164	0.194	0.095	0.141	0.102	0.134	0.336	0.203
(d)	1.920	2.609	1.354	1.289	1.470	1.355	1.847	1.437
SUB-TOTAL [m]:	3.352	4.757	3.390	2.738	3.658	2.988	3.458	2.587

FIGURA A7.2 – FRENTE 08 – GRÁFICO RESUMO DO RESULTADOS

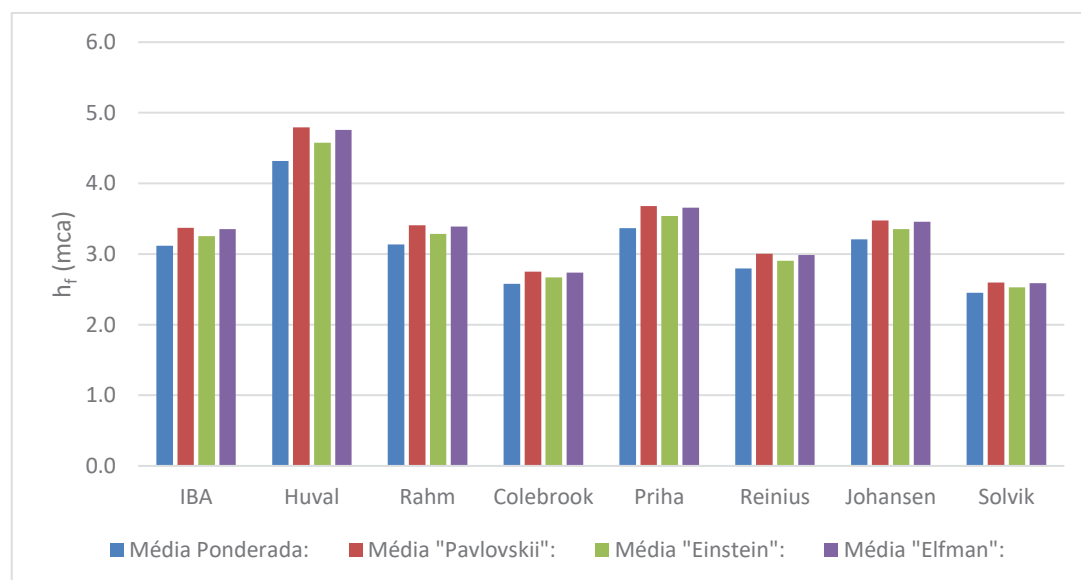
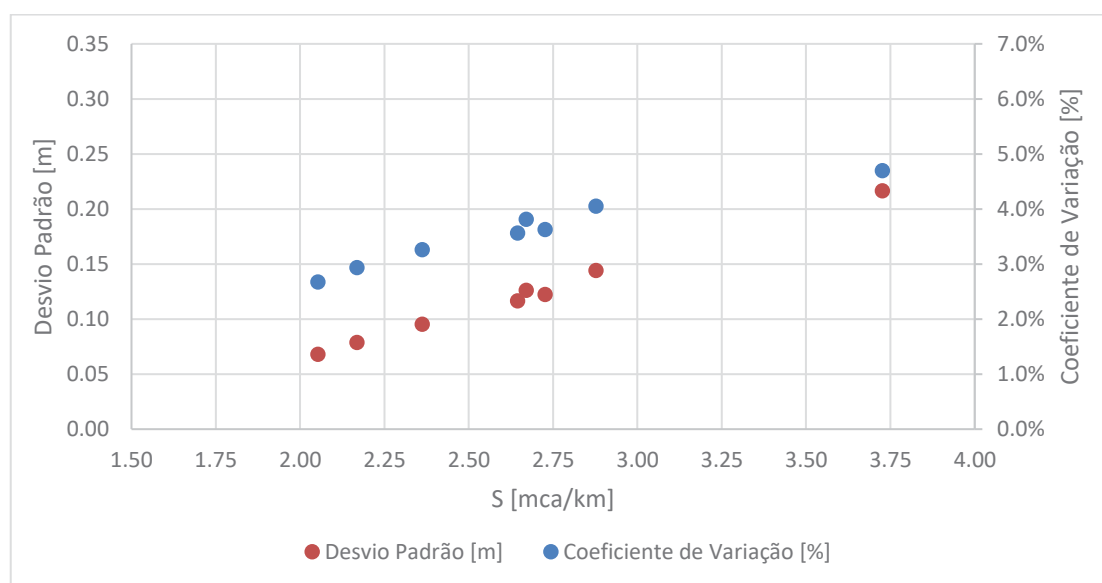


FIGURA A7.3 – FRENTE 08 – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DO DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS



APÊNDICE B – PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS E ADICIONAIS

Os seguintes dados de entrada foram considerados no cálculo de perdas de carga localizadas e adicionais:

- $Q_{total} = 150 \text{ m}^3/s$
- $Q_{unitária} = 75 \text{ m}^3/s$
- $\varepsilon_{concreto} = 1,00\text{mm}$
- $\varepsilon_{aço} = 0,10\text{mm}$

Alguns detalhes e parâmetros utilizados nos cálculos das perdas ao longo dos equipamentos e trechos do circuito são detalhados na sequência, enquanto os principais dados de entrada e cálculos são apresentados na TABELA B1.1. Para mais informações sobre esses parâmetros ver capítulo 2.4.

1) Grades da Tomada d'Água

- $K_d = 1,20$
- $K_f = 0,51$
- $p = 0,27$
- $L = 0,051\text{m}$
- $b = 0,15\text{m}$

2) Ranhuras

- $n = 1$
- $\gamma = 90^\circ$
- $l = 0,85\text{m}$
- $b = 22,70\text{m}$

3) “Rock-trap” – Quebrada Chimao

- $n = 12$
- $\gamma = 90^\circ$
- $l = 4,06\text{m}$
- $b = 5,10\text{m}$

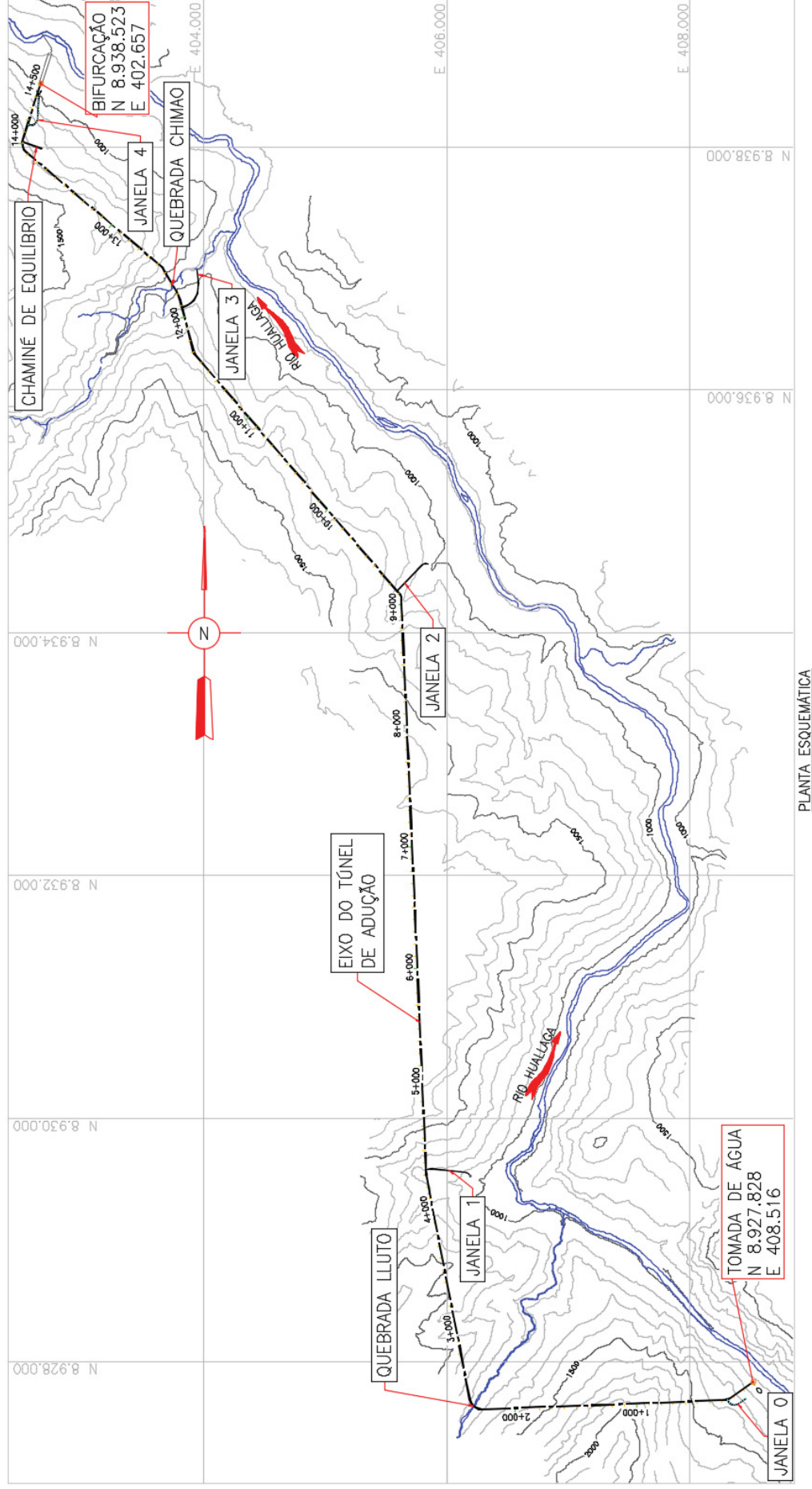
4) “Rock-trap” – Blindagem Final

- $n = 8$
- $\gamma = 90^\circ$

- $l = 0,813m$
- $b = 5,10m$

Adicionalmente, para auxiliar na compreensão dos diferentes trechos, são apresentados os desenhos esquemáticos em Planta (Figura B1.1) e Corte (Figura B1.2) do circuito de adução.

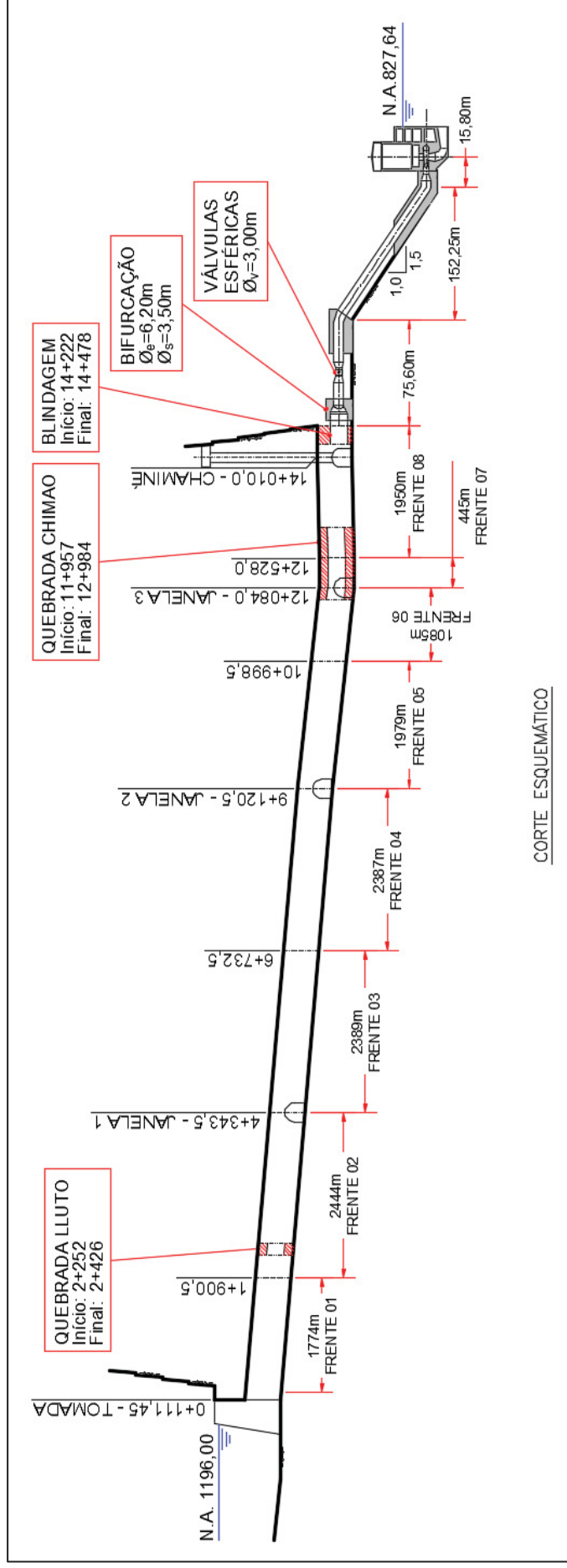
FIGURA B1.1 – DESENHO DO CIRCUITO DE ADUÇÃO DA USINA HIDROELÉTRICA CHAGLLA – PLANTA ESQUEMÁTICA



PLANTA ESQUEMÁTICA

FONTE: INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2014)

FIGURA B1.2 – DESENHO DO CIRCUITO DE ADUÇÃO DA USINA HIDROELÉTRICA CHAGLLA – CORTE ESQUEMÁTICO



FONTE: O autor (2018)

O resumo dos cálculos de perdas localizadas e adicionais são apresentado na TABELA B1.1.

TABELA B1.1 – RESUMO DE PERDAS LOCALIZADAS E ADICIONAIS

ITEM	FRENTE	ESTACA	Comp. [m]	Largura ou Ø [m]	Altura [m]	Área [m²]	Perímetro [m]	Ø _h [m]	Vel. [m/s]	Ângulo [graus]	Raio [m]	ε [mm]	f [-]	ζ _{loc} [-]	Δh _{dist} [m]	Δh _{loc} [m]
Grades da T.A.	01			11.00	12.31	135.41	46.62	11.62	1.11	84.29		0.10		1.1891		0.074
Tomada de Água	01		12.25	8.00	7.35	58.80	30.70	7.66	2.55			1.00	0.013	0.0200	0.007	0.007
Ranhurás	01			8.00	7.35	58.80	30.70	7.66	2.55			1.00		0.0033		0.001
Aeração	01			8.00	7.35	58.80	30.70	7.66	2.55			1.00		0.0001		0.000
Transição T.A.-Túnel	01		5.00	8.00	7.35	58.80	30.70	7.66	2.55	3.14		1.00	0.013	0.0003	0.003	0.000
Nicho 1	01(a)	0+220				58.93	28.44	8.29	2.55					0.0500		0.017
Curva	01(a)	0+230				58.93	28.44	8.29	2.55	32.50	100.0			0.0587		0.019
Janela 0	01(a)	0+260				58.93	28.44	8.29	2.55					0.0500		0.017
Nicho 2	01(a)	0+465				58.93	28.44	8.29	2.55					0.0500		0.017
Nicho 3	01(a)	0+870				58.93	28.44	8.29	2.55					0.0500		0.017
Nicho 4	01(a)	1+250				58.93	28.44	8.29	2.55					0.0500		0.017
Contração	02(b)	2+252.8	6.00			58.93	28.44	8.29	2.55	10.12		1.00	0.013	0.0038	0.004	0.002
Retilíneo	02(b)	2+258.8	19.50	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31			1.00	0.013		0.018	
Curva	02(b)	2+278	141.77	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31	81.23	100.0	1.00	0.013	0.1112	0.132	0.062
Expansão	02(b)	2+420	6.00	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31	10.44		1.00	0.013	0.0070	0.004	0.004
Nicho 5	02(c)	2+430				59.40	28.58	8.31	2.53					0.0500		0.016
Nicho 6	02(e)	2+800				56.78	27.79	8.17	2.64					0.0500		0.018
Nicho 7	02(i)	3+210				53.78	27.11	7.94	2.79					0.0500		0.020
Nicho 8	02(j)	3+600				55.28	27.56	8.02	2.71					0.0500		0.019
Nicho 9	02(j)	4+000				55.28	27.56	8.02	2.71					0.0500		0.019
Janela 1	02(j)	4+350				55.28	27.56	8.02	2.71					0.0500		0.019
Nicho 10	03(c)	4+700				53.09	27.06	7.85	2.83					0.0500		0.020
Nicho 11	03(e)	5+050				54.24	27.24	7.96	2.77					0.0500		0.019
Nicho 12	03(g)	5+435				57.61	28.11	8.20	2.60					0.0500		0.017

ITEM	FRENTE	ESTACA	Comp. [m]	Largura ou ϕ [m]	Altura [m]	Área [m ²]	Perímetro [m]	ϕ_h [m]	Vel. [m/s]	Ângulo [graus]	Raio [m]	ε [mm]	f [-]	ζ_{loc} [-]	Δh_{dist} [m]	Δh_{loc} [m]
Nicho 13	03(i)	5+865				58.02	28.20	8.23	2.59					0.0500		0.017
Nicho 14	03(k)	6+275				58.26	28.24	8.25	2.57					0.0500		0.017
Nicho 15	03(m)	6+675				58.94	28.37	8.31	2.54					0.0500		0.017
Nicho 16	04(a)	7+080				58.66	28.35	8.28	2.56					0.0500		0.017
Nicho 17	04(b)	7+950				62.97	29.34	8.59	2.38					0.0500		0.014
Nicho 18	04(c)	8+380				49.34	25.74	7.67	3.04					0.0500		0.024
Nicho 19	04(e)	8+740				58.63	28.46	8.24	2.56					0.0500		0.017
Curva	04(g)	9+040				59.58	28.66	8.32	2.52	38.05	100.0			0.0669		0.022
Janela 2	04(g)	9+120				59.58	28.66	8.32	2.52					0.0500		0.016
Nicho 20	05(b)	9+550				59.34	28.76	8.25	2.53					0.0500		0.016
Nicho 21	05(b)	9+915				59.34	28.76	8.25	2.53					0.0500		0.016
Nicho 22	05(c)	10+335				60.23	28.83	8.36	2.49					0.0500		0.016
Nicho 23	06(b)	11+175				62.86	29.17	8.62	2.39					0.0500		0.015
Nicho 24	06(d)	11+595				62.75	29.22	8.59	2.39					0.0500		0.015
Curva	06(d)	11+670				62.75	29.22	8.59	2.39	26.18	100.0			0.0497		0.014
Rock-trap	06(d)	11+852.5				62.75	29.22	8.59	2.39					0.0402		0.012
Contração	06(e)	11+957	6.00			51.15	26.02	7.86	2.93	12.08		1.00	0.013	0.0059	0.006	0.005
Retilíneo	07	11+963	12.00	6.80		36.32	21.36	6.80	4.13			1.00	0.013		0.020	
Expansão	07	11+975	3.00	6.80		36.32	21.36	6.80	4.13	15.19		1.00	0.013	0.0097	0.004	0.008
Retilíneo	07	11+978	120.09	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31			1.00	0.013		0.111	
Janela 3	07	12+084		7.60		45.36	23.88	7.60	3.31			1.00		0.0500		0.028
Contração	07	12+098	10.07	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31	9.08		1.00	0.013	0.0054	0.017	0.008
Retilíneo	07	12+108	40.17	6.00		28.27	18.85	6.00	5.31			0.10	0.009		0.084	
Curva	07	12+148	54.98	6.00		28.27	18.85	6.00	5.31	15.75	200.0	0.10	0.009	0.0189	0.118	0.027
Retilíneo	07	12+203	202.57	6.00		28.27	18.85	6.00	5.31			0.10	0.009		0.424	
Expansão	07	12+406	10.00	6.00		28.27	18.85	6.00	5.31	9.15		1.00	0.013	0.0142	0.018	0.020
Curva	07	12+416	68.49	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31	19.62	200.0	1.00	0.013	0.0258	0.064	0.014
Retilíneo	07	12+484	121.54	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31			1.00	0.013		0.113	
Contração	07	12+605	6.00	7.60		45.36	23.88	7.60	3.31	10.48		1.00	0.013	0.0046	0.008	0.005
Retilíneo	07	12+611	371.18	6.50		33.18	20.42	6.50	4.52			1.00	0.013		0.775	
Expansão	07	12+983	0.75	6.50		33.18	20.42	6.50	4.52	109.81		1.00	0.013	0.2021	0.001	0.210
Nicho 25	08(a)	13+000				58.56	28.35	8.26	2.56					0.0500		0.017

ITEM	FRENTE	ESTACA	Comp. [m]	Largura ou ϕ [m]	Altura [m]	Área [m²]	Perímetro [m]	ϕ_h [m]	Vel. [m/s]	Ângulo [graus]	Raio [m]	ε [mm]	f	ζ_{loc} [-]	Δh_{dist} [m]	Δh_{loc} [m]
Nicho 26	08(b)	13+405				53.74	27.06	7.94	2.79					0.0500		0.020
Nicho 27	08(d)	13+805				53.74	27.21	7.90	2.79					0.0500		0.020
Curva	08(d)	13+916				53.74	27.21	7.90	2.79	67.20	100.0			0.1001		0.040
Chaminé	08(d)	14+010				53.74	27.21	7.90	2.79					0.0500		0.020
Janela 4	08(d)	14+164				53.74	27.21	7.90	2.79					0.0500		0.020
Rock-trap	08(d)	14+216				53.74	27.21	7.90	2.79					0.0016		0.001
Contração	08(d)	14+222	6.00			53.74	27.21	7.90	2.79	19.59		1.00	0.013	0.0158	0.008	0.020
Retilíneo	Blindagem	14+228	267.00	6.20		30.19	19.48	6.20	4.97			0.10	0.009		0.471	
Bifurcação	Conduto	14+494		6.20		30.19	19.48	6.20	4.97	60.00		0.10		0.0218		0.068
Retilíneo	Conduto	14+500	11.63	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80			0.10	0.010		0.098	
Curva	Conduto	14+512	5.50	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80	30.00	10.5	0.10	0.010	0.1087	0.047	0.337
Retilíneo	Conduto	14+517.5	39.45	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80			0.10	0.010		0.334	
Contração	Conduto	14+557	3.00	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80	9.53		0.10	0.010	0.0041	0.038	0.023
Válvula Esférica	Conduto	14+560	7.00	3.00		7.07	9.42	3.00	10.61			0.10	0.010		0.131	
Expansão	Conduto	14+567	3.00	3.00		7.07	9.42	3.00	10.61	9.53		1.00	0.015	0.0076	0.061	0.043
Retilíneo	Conduto	14+570	19.85	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80			0.10	0.010		0.168	
Curva	Conduto	14+590	7.06	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80	33.69	12.0	0.10	0.010	0.1122	0.061	0.348
Retilíneo	Conduto	14+597	175.70	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80			0.10	0.010		1.487	
Curva	Conduto	14+773	7.06	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80	33.69	12.0	0.10	0.010	0.1122	0.061	0.348
Contração	Conduto	14+776	3.00	3.50		9.62	11.00	3.50	7.80	13.12		0.10	0.010	0.0079	0.046	0.059
Retilíneo	Conduto	14+779	1.10	2.81		6.20	8.83	2.81	12.09			0.10	0.010		0.029	
SUB-TOTAL:															4.972	2.390

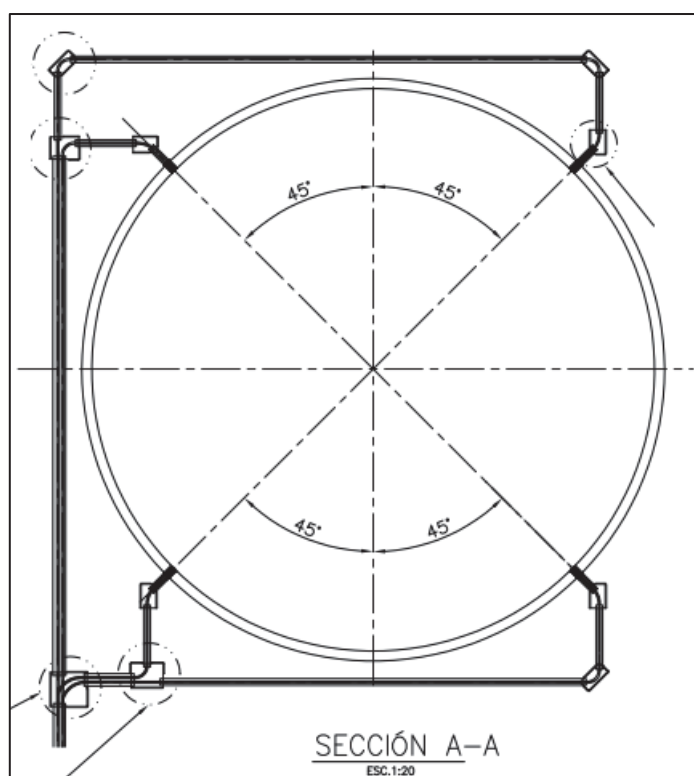
As perdas de cargas localizadas e adicionais resulta, finalmente, em:

- $h_{f_{loc+ad}} = 7,36m$

APÊNDICE C – PERDAS DE CARGA MEDIDAS DURANTE OPERAÇÃO

As perdas de carga obtidas durante operação da usina foram determinadas com base em medições do nível de água montante, das vazões turbinadas e das pressões na entrada das caixas espirais. Os níveis são obtidos através de sensores hidrostáticos instalados na tomada d'água da usina. A vazão turbinada é determinada utilizando o método “*Winter-Kennedy*”, conforme descrito no ANEXO A, obtida após calibração efetuada durante período de comissionamento pelo fabricante. A pressão na entrada da caixa espiral é obtida através de 4 sensores piezométricos instalados diametralmente, conforme FIGURA C1.

FIGURA C1 – POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS NA ENTRADA DA CAIXA ESPIRAL



Todas estas medições foram armazenadas em registros de operação durante 2 dias distintos, sendo uma no dia 18-10-2016 e outra no dia 12-11-2016, disponibilizadas então para análise posterior.

FIGURA C2 – REGISTRO DE MEDIÇÕES DE VAZÕES E PRESSÕES NA ENTRADA DAS CAIXAS ESPIRAIS DO DIA 18-10-2016

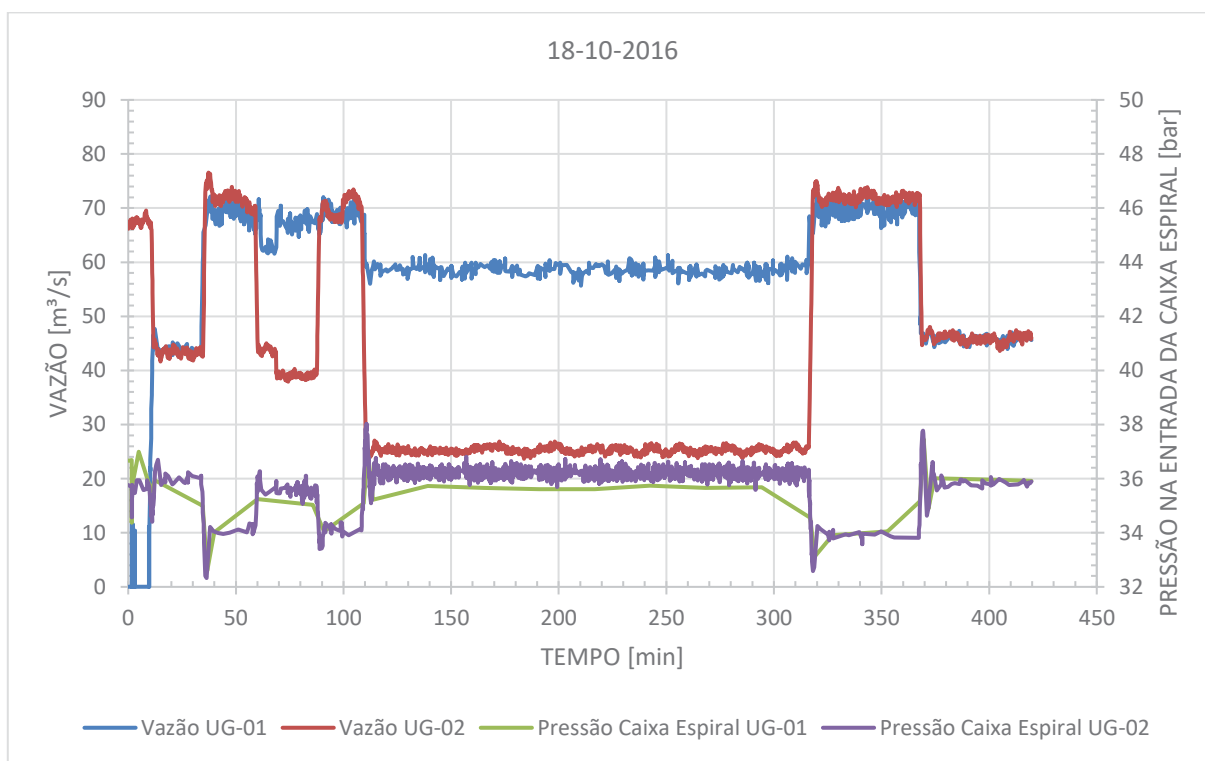


FIGURA C3 – REGISTRO DE MEDIÇÕES DE NÍVEIS DO DIA 18-10-2016

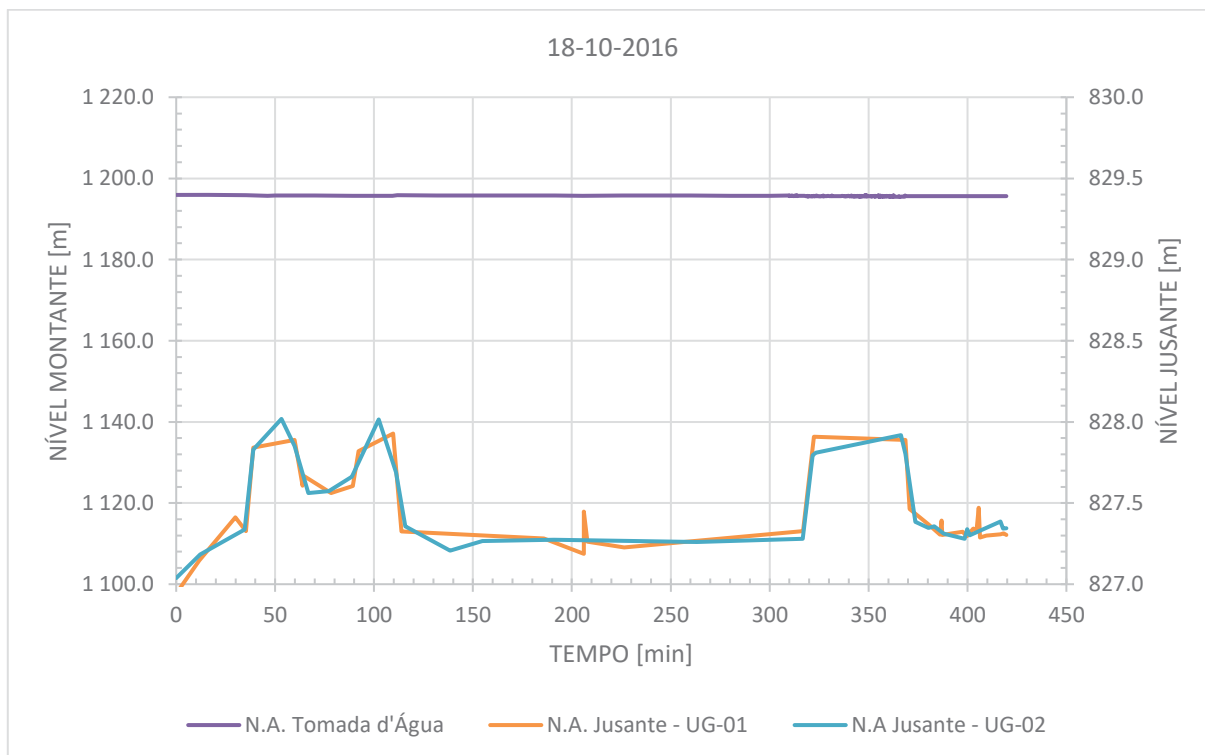


FIGURA C4 – REGISTRO DE MEDIÇÕES DE VAZÕES E PRESSÕES NA ENTRADA DAS CAIXAS ESPIRAIS DO DIA 12-11-2016

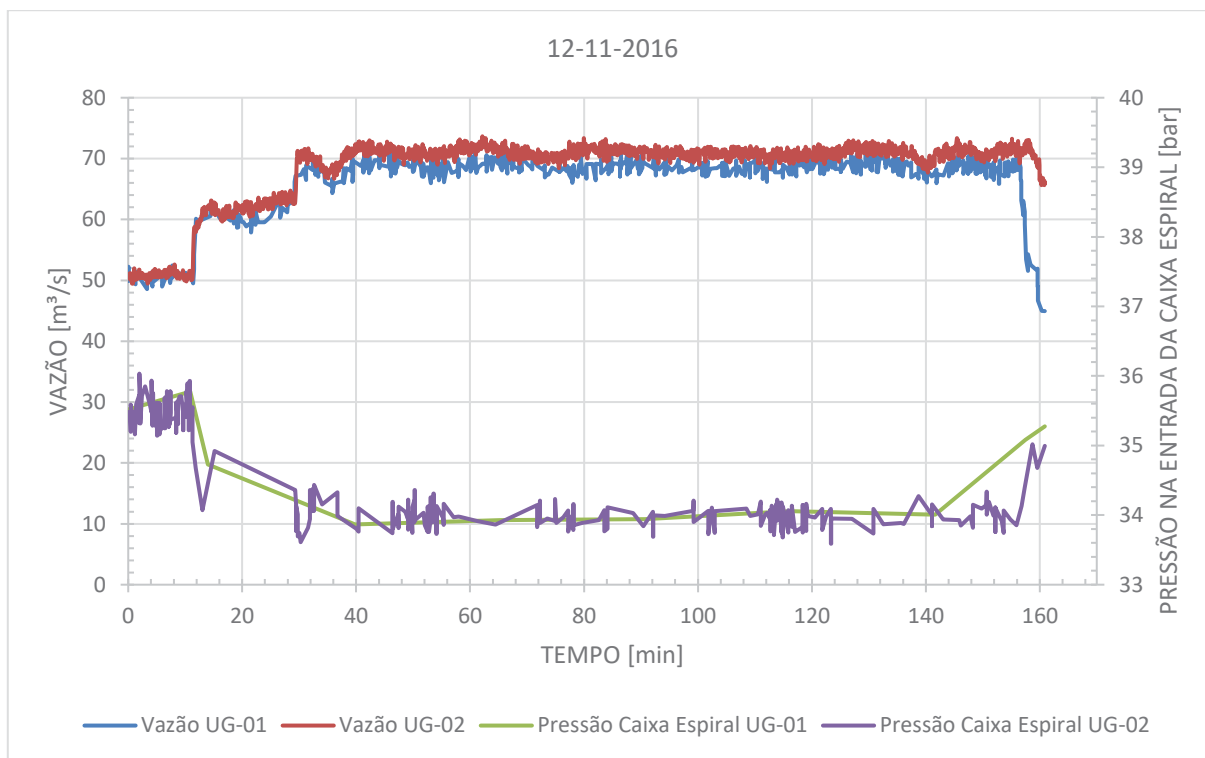
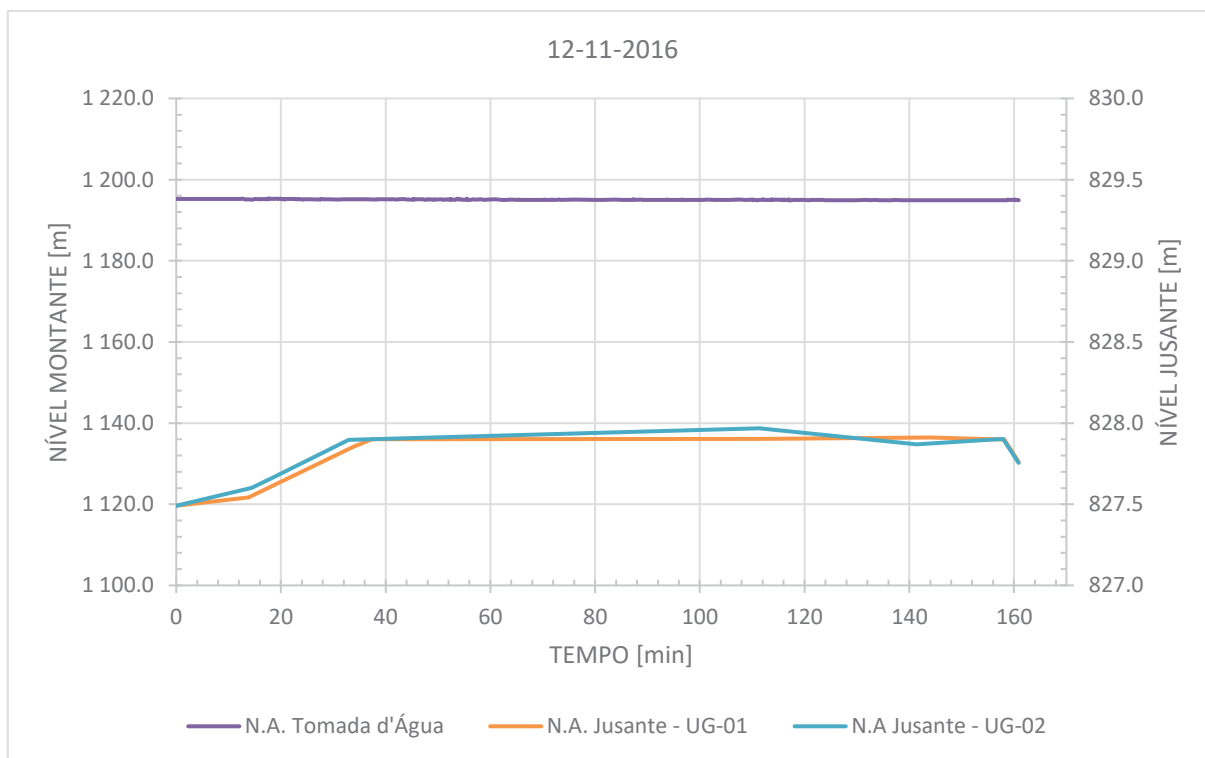


FIGURA C5 – REGISTRO DE MEDIÇÕES DE NÍVEIS DE ÁGUA DO DIA 12-11-2016



Com base nos gráficos apresentados nas FIGURAS C2 a C5, foram filtrados os valores que apresentaram a maior estabilidade de operação, conforme TABELA C1.

TABELA C1 – FAIXA DE MEDIÇÃO CONSIDERADA EM CADA REGISTRO DE OPERAÇÃO

DATA DE REGISTRO	TEMPO INICIAL [min]	TEMPO FINAL [min]
18/10/2016	117	310
12/11/2016	40	138

Destas faixas de medição, foram obtidas as médias de cada parâmetro, resumidas na TABELA C2.

TABELA C2 – MÉDIAS DOS PARÂMETROS OBTIDAS NA FAIXA DE MEDIÇÃO CONSIDERADA

DATA DE REGISTRO	VAZÃO UG-01	VAZÃO UG-02	N.A. TOMADA D'ÁGUA	PRESSÃO CAIXA ESPIRAL UG-01	PRESSÃO CAIXA ESPIRAL UG-02	N.A. JUSANTE UG-01	N.A. JUSANTE UG-02
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m]	[bar]	[bar]	[m]	[m]
18/10/2016	58.6	25.3	1195.8	35.67	36.21	827.4	827.3
12/11/2016	68.9	71.1	1195.0	33.95	33.97	828.1	828.2

Partindo destes dados foi possível determinar então a queda bruta e a queda líquida de cada unidade geradora (UG).

A queda bruta é definida como a diferença entre o nível na tomada d'água e o nível no canal de fuga a jusante da casa de força.

A queda líquida é definida como a diferença entre o nível piezométrico na entrada da caixa espiral e o nível no canal de fuga. Este nível piezométrico é calculado conforme equação C1.

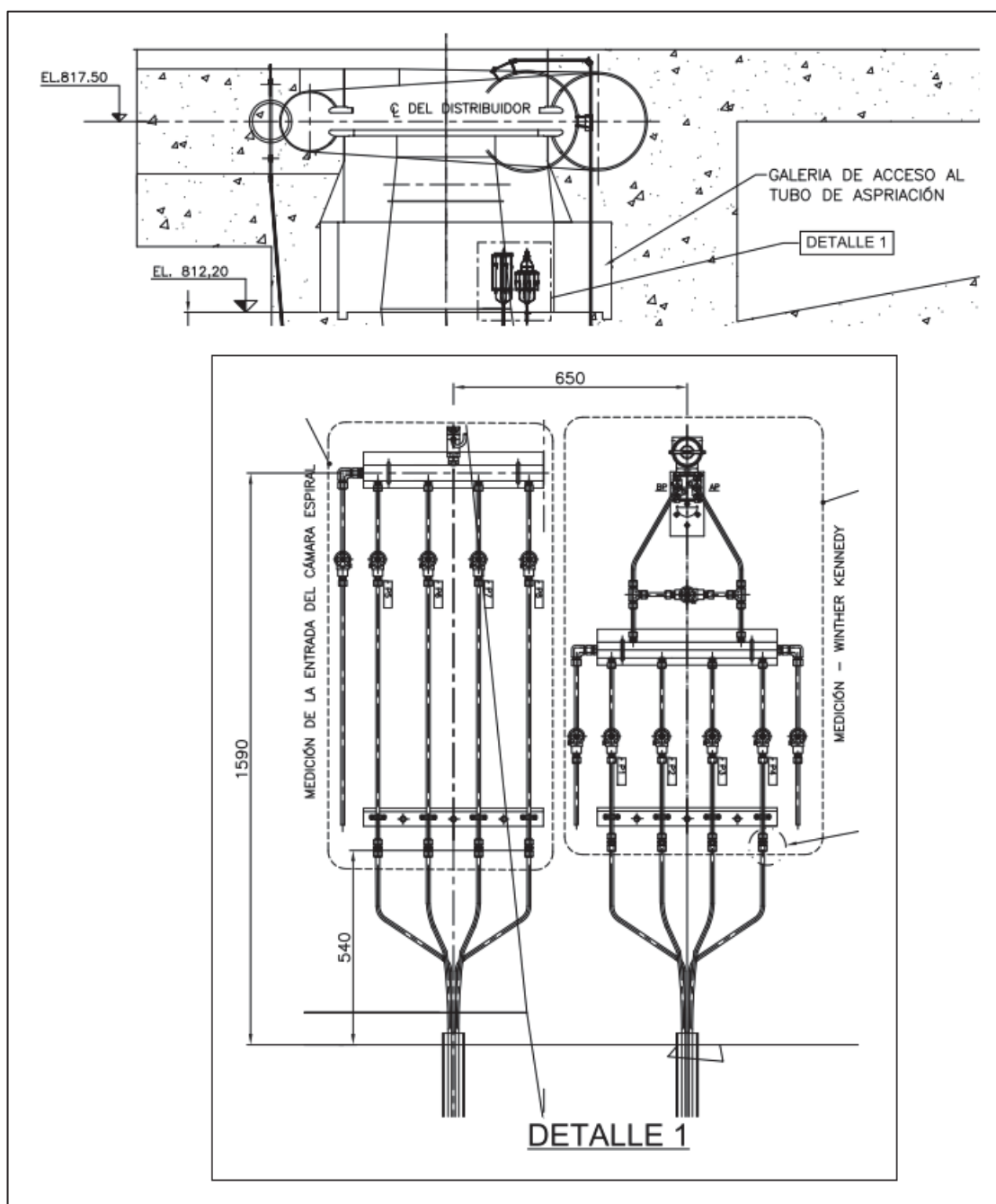
$$NP_{ce} = \frac{100,07.p_{ce}}{g} + El_{press} + \alpha \cdot \frac{v_{ce}^2}{2.g} \quad [C1]$$

Onde:

- p_{ce} é a pressão medida na entrada da caixa espiral [bar];
- g é a aceleração gravitacional local [9,78m/s²];
- El_{press} é elevação de instalação do pressostato [m];
- α é o fator de correção de energia cinética;
- v_{ce} é a velocidade na entrada da caixa espiral [m/s].

A elevação do pressostato foi estabelecida com base no desenho de instalação do fabricante (FIGURA C6), cujo valor é de aproximadamente 813,80m.

FIGURA C6 – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS PRESSOSTATOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO NA ENTRADA DA CAIXA ESPIRAL E *WINTER-KENNEDY*



O fator de correção de energia cinética foi calculado conforme item 2.5, considerando a rugosidade de aço e a velocidade na entrada da caixa espiral:

- $\alpha = 1,0627$

A velocidade da caixa espiral é definida com base na vazão turbinada de cada unidade e no diâmetro da seção de entrada da caixa espiral:

- $D_{ce} = 2,813m$

Desta maneira, os resultados obtidos para cada data de registro estão resumidos na TABELA C3.

TABELA C3 – PERDAS DE CARGA CALCULADAS ATRAVÉS DOS REGISTROS DE MEDIÇÃO

	18/10/2016		12/11/2016	
	UG-01	UG-02	UG-01	UG-02
NAM [m]:	1195.8	1195.8	1195.0	1195.0
NAJ [m]:	827.4	827.3	828.1	828.2
Q _{un} [m ³ /s]:	58.6	25.3	68.9	71.1
H _{br} [m]:	368.3	368.5	366.9	366.8
v _{ce} [m/s]:	9.42	4.06	11.08	11.43
NP _{ce} [m]:	1183.6	1185.2	1167.8	1168.5
H _{liq} [m]:	356.2	358.0	339.7	340.3
h _{f_registro} [m]:	12.16	10.52	27.19	26.58

A definição dos coeficientes da equação de perda de carga (equação [58]) do circuito buscou, através de método iterativo, minimizar as diferenças dos valores medidos nas duas unidades geradoras nos distintos dias de aquisição de registros, onde finalmente esses coeficientes resultaram em:

- $K_{tot} = 0,001056141$
- $K_{unit} = 0,001268229$

ANEXO A – MÉTODO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO “WINTER-KENNEDY”

FIGURA D1.1 – DESCRITIVO TÍPICO DO MÉTODO WINTER-KENNEDY PRESENTE EM RELATÓRIOS DE TRANSPOSIÇÃO DE MODELOS

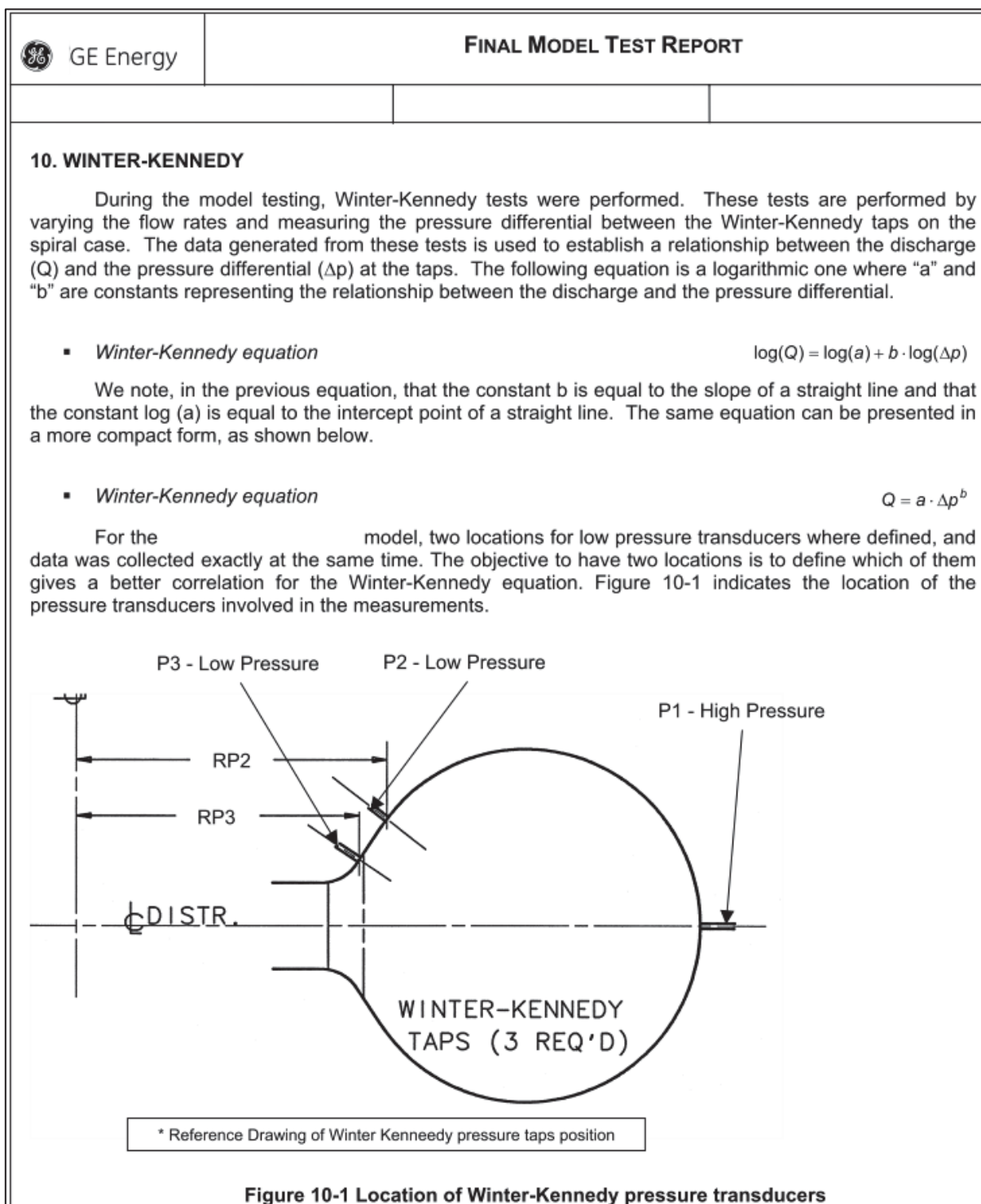


FIGURA D1.2 – POSIÇÃO E DETALHES DE INSTALAÇÃO DAS TOMADAS “WINTER-KENNEDY” NAS TURBINAS DA USINA HIDRELÉTRICA CHAGLLA

